

# UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS  
Departamento de Geodinámica



## TESIS DOCTORAL

**Unidades geotécnicas del futuro enlace fijo a través del Estrecho de Gibraltar: Recopilación de datos históricos, caracterización geotécnica y modelización de ensayos presiométricos en medio anisótropo**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

**Mauro Muñoz Menéndez**

Directores

Áurea Perucho Martínez  
Martín Jesús Rodríguez Peces  
Herminia Cano Linares

**Madrid, 2015**

**Universidad Complutense de Madrid**  
**Facultad de Ciencias Geológicas**  
**Departamento de Geodinámica**



**TESIS DOCTORAL**

# **UNIDADES GEOTÉCNICAS DEL FUTURO ENLACE FIJO A TRAVÉS DEL ESTRECHO DE GIBRALTAR:**

**Recopilación de datos históricos, caracterización geotécnica y  
modelización de ensayos presiométricos en medio anisótropo**

**MAURO MUÑIZ MENÉNDEZ**

**Madrid, 2015**





Universidad Complutense de Madrid  
Facultad de Ciencias Geológicas  
Departamento de Geodinámica



TESIS DOCTORAL

## UNIDADES GEOTÉCNICAS DEL FUTURO ENLACE FIJO A TRAVÉS DEL ESTRECHO DE GIBRALTAR:

Recopilación de datos históricos, caracterización geotécnica y  
modelización de ensayos presiométricos en medio anisótropo

MAURO MUÑOZ MENÉNDEZ

Dirigida por:

Áurea Perucho Martinez  
Doctora Ingeniera de Caminos Canales y Puertos

Martín Jesús Rodríguez Peces  
Doctor en Geología

Herminia Cano Linares  
Doctora Ingeniera de Caminos Canales y Puertos





Universidad Complutense de Madrid  
Facultad de Ciencias Geológicas  
Departamento de Geodinámica



TESIS DOCTORAL

## UNIDADES GEOTÉCNICAS DEL FUTURO ENLACE FIJO A TRAVÉS DEL ESTRECHO DE GIBRALTAR:

Recopilación de datos históricos, caracterización geotécnica y modelización de ensayos  
presiométricos en medio anisótropo

MAURO MUÑIZ MENÉNDEZ

Memoria para optar al Grado de Doctor en Geología e Ingeniería Geológica

VºBº de los directores de la tesis:

Dra. Áurea Perucho Martínez

Dr. Martín Jesús Rodríguez Peces

Dra. Herminia Cano Linares





# AGRADECIMIENTOS

Un trabajo como el que se desarrolla en esta tesis doctoral es imposible de abordar por una sola persona. Se requiere de la ayuda y colaboración de muchos compañeros y amigos que, cada uno en su ámbito, han echado una mano (o varias) para hacer lo posible.

En primer lugar me gustaría mencionar a mis directores. Ellos se han preocupado de encauzar este trabajo (cosa que en algún momento parecía casi imposible) y hacerlo llegar a buen puerto con sus consejos, sugerencias y correcciones. Muchas gracias Áurea, Martín y Herminia, gran parte de esta tesis es mérito vuestro.

Quiero agradecer enormemente al CEDEX, y especialmente al Laboratorio de Geotecnia, el apoyo económico que ha hecho posible que yo desarrollara este trabajo. Muchas gracias al director del Laboratorio, Fernando Pardo, que como director, compañero y amigo ha sido un gran soporte desde que yo apareciera por el CEDEX en 2009 para realizar el Master al que también le debo mucho.

En el CEDEX han sido muchísimos más los trabajadores que me han ayudado en este camino, en estos años he tenido el placer de trabajar codo con codo con grades profesionales que me han enseñado mucho del trabajo en el laboratorio y en el campo. Muchas gracias a Manuel Pintado, José Luis Fernández Rocha y M<sup>a</sup> Eugenia Martín por enseñarme y ayudarme a “romper” todas esas muestras. Y al equipo de campo: Pedro Juan, Amores, Baudet, Ángel, Rufino, Pedro, Josito, Muiños, Raúl, etc. muchas gracias por los buenos ratos que hemos pasado. Otros que siempre han estado ahí para echar una mano, a cualquier hora, ofreciendo buenos consejos y poniendo siempre buena cara han sido Toledo y Felipe, muchas gracias a los dos.

Mi más sincero agradecimiento a José Estaire por sus clarísimas y acertadas revisiones, y a Javier Moreno por introducirme en el mundo de los modelos informáticos. A Javier González-Gallego, que desde la coordinación del Master siempre me ha tenido en cuenta. A Encina Polo por su labor en la biblioteca.

La gran mayoría de esta tesis se ha basado en los datos que me ha facilitado SECEG y, por tanto, mis más sinceros agradecimientos para la institución y, sobre todo, para sus profesionales que tanto me han ayudado. Personifico mi agradecimiento en el geólogo y amigo Nicolás Sandoval.

A mis compañeros del día a día, con los que he compartido mesa y mantel y sobre todo risas, una parte de esta tesis es gracias a vosotros: María de Groot, Ángel Tijera, Rubén Ruiz, Manuel Dávila, Margarita Conde, Rebeca Hinojal, David Muñoz, Antonio Prado y Elena de la Maza.

Fuera del trabajo debo agradecer esta tesis a mi familia que ha hecho posible que llegara aquí.

Muchas gracias a mis amigos, que seguramente hayan aportado algo en este camino (la mayoría de ellos para mal, jajaja). Aunque estéis diseminados por el mundo no me olvido de vosotros: un abrazo para Sergio y Majo, con los que siempre me apetece tomarme unas sidras. A todos los de la facultad, a los que gracias a Hartmanweb puedo seguir la pista. A Elena y Nacho por las más divertidas noches de juegos. A Auri y Luismi por las fotos de Lúa y no por las vuestras. A Paula, Carlos y los niños por los “relajados” fines de semana en Guadalajara. Y a Paco, Patri y la peque a los que espero ver más a partir de ahora.

Finalmente quiero agradecer a Raquel, con la que comparto la vida y a la que oírme hablar de esta tesis seguro que le ha dado más de un dolor de cabeza, aunque no dijera nada.



# ÍNDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>SÍMBOLOS .....</b>	<b>9</b>
<b>ABREVIATURAS .....</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
1.1    Introducción.....	15
1.2    Objetivos .....	18
1.3    Estructura de la tesis .....	18
<b>2. CONTEXTO GEOLÓGICO .....</b>	<b>23</b>
2.1    Localización.....	23
2.2    Antecedentes .....	24
2.3    Geología Regional .....	24
2.4    Tectónica.....	27
2.5    Estratigrafía de las distintas unidades .....	28
2.5.1    Unidad de Algeciras (Beni-Ilder).....	28
2.5.2    Unidad de Los Nogales (Yebel Tisirène).....	29
2.5.3    Unidad de Bolonia (Tala Lakrah) .....	30
2.5.4    Unidad del Aljibe (Numídico) .....	30
2.5.5    Unidad de Facinas (Melloussa) .....	31
2.5.6    Unidad de Almarchal (Tanger).....	32
2.5.7    Rellenos de paleocanal .....	33
2.6    Afección de cada unidad al proyecto de túnel .....	36
<b>3. RECOPIACIÓN DE DATOS GEOTÉCNICOS PREVIOS.....</b>	<b>41</b>
3.1    Excavaciones experimentales.....	43
3.1.1    Zanjas de experimentación .....	44
3.1.2    Pozo de Bolonia.....	50
3.1.3    Galería experimental de Tarifa .....	56
3.1.4    Galerías y pozos de Malabata .....	60
3.1.5    Pozo del Huerto de la Tabla .....	62
3.2    Sondeos.....	63
3.2.1    Campaña 1982-1983 .....	64
3.2.2    1ª Campaña Marruecos (1983) .....	71
3.2.3    2ª Campaña Marruecos (1992) .....	71
3.2.4    Campaña Sea Nautilus (1991) .....	72



3.2.5	Campaña Pholas (1992) .....	74
3.2.6	Campaña Kommandor Therese (1994) .....	75
3.2.7	Campaña Bavenit (1995) .....	77
3.2.8	Campaña Bucentaur (1997) .....	79
3.2.9	Campaña Norskald (1998-99) .....	81
3.2.10	Campaña Kingfisher (2005) .....	84
3.3	Ensayos de campo .....	89
3.3.1	Unidad de Algeciras (Beni Ider) .....	89
3.3.2	Unidad de Bolonia (Tala Lakhrah) .....	96
3.3.3	Unidad de Facinas (Mellousa) .....	100
3.3.4	Unidad de Almarchal (Tanger) .....	100
3.3.5	Brechas cuaternarias .....	110
3.3.6	Arenas Bioclásticas .....	110
3.4	Ensayos de laboratorio .....	110
3.4.1	Unidad de Algeciras (Beni Ider) .....	111
3.4.2	Unidad de Bolonia (Tala Lakhrah) .....	119
3.4.3	Unidad de Facinas (Mellousa) .....	121
3.4.4	Unidad de Almarchal (Tanger) .....	122
3.4.5	Brechas cuaternarias .....	130
3.4.6	Arenas bioclásticas .....	136
3.5	Cantidad de datos analizados .....	138
<b>4.</b>	<b>NUEVA CAMPAÑA CEDEX-SECEG - TARIFA 2012 .....</b>	<b>141</b>
4.1	Campaña de sondeos .....	142
4.2	Campaña de ensayos presiométricos .....	145
4.3	Campaña de ensayos de laboratorio .....	148
4.3.1	Tallado de muestras .....	148
4.3.2	Ensayos de laboratorio realizados .....	149
4.3.3	Grado de anisotropía .....	151
4.3.4	Principales resultados de los ensayos de laboratorio .....	153
4.4	Características geotécnicas más destacables de las tres formaciones de la Unidad Algeciras .....	164
4.5	Conclusiones de esta campaña: .....	167
<b>5.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA .....</b>	<b>171</b>
5.1	Metodología .....	171
5.1.1	Filtrado, corrección y procesado de los datos .....	172
5.1.2	Determinación de los parámetros estadísticos .....	172
5.1.3	Ajuste a una distribución estadística .....	173
5.1.4	Obtención de los valores característicos .....	174
5.1.5	Determinación de los rangos de confianza para la población .....	178
5.1.6	Estimación del número de datos necesarios para un error dado .....	178

5.1.7	Determinación del grado de caracterización de cada unidad .....	179
5.2	Caracterización geotécnica de las diferentes unidades .....	183
5.2.1	Unidad de Algeciras (Beni Ider).....	185
5.2.2	Unidad de Bolonia (Tala Lakrah) .....	204
5.2.3	Unidad de Facinas (Mellousa) .....	211
5.2.4	Unidad de Almarchal (Tanger).....	216
5.2.5	Brechas .....	229
5.2.6	Arenas Bioclásticas.....	233
5.3	Grado de caracterización de cada unidad .....	236
5.3.1	Unidad de Algeciras (Beni Ider).....	236
5.3.2	Unidad de Bolonia (Tala Lakrah) .....	237
5.3.3	Unidad de Facinas (Mellousa) .....	239
5.3.4	Unidad de Almarchal (Tanger).....	240
5.3.5	Brechas .....	240
5.3.6	Arenas bioclásticas .....	241
5.3.7	Grado de caracterización global .....	241
5.4	Resumen y conclusiones de la caracterización geotécnica de las unidades .....	243
<b>6.</b>	<b>MODELIZACIÓN DEL ENSAYO PRESIOMÉTRICO EN MEDIOS ANISÓTROPOS.....</b>	<b>249</b>
6.1	Marco teórico.....	250
6.1.1	El ensayo presio-dilatométrico.....	250
6.1.2	Rigidez de las discontinuidades .....	253
6.1.3	Modelos elásticos teóricos .....	254
6.1.4	Deformación de cavidad cilíndrica en medio anisótropo.....	261
6.1.5	Métodos numéricos en geotecnia.....	274
6.2	Comparación entre modelos continuos y discontinuos .....	276
6.2.1	Metodología .....	277
6.2.2	Influencia de la posición de las discontinuidades.....	281
6.2.3	Efecto escala .....	285
6.2.4	Conclusiones .....	287
6.3	Modelo elegido .....	288
6.3.1	Parámetros de entrada.....	290
6.4	Resultados .....	292
6.5	Análisis.....	295
6.5.1	Deformación con $\beta < \chi$ .....	296
6.5.2	Deformación con $\beta > \chi$ .....	298
6.6	Aplicación.....	300
6.6.1	Ensayos con $\beta < \chi$ .....	300
6.6.2	Ensayos con $\beta > \chi$ .....	302
6.7	Cálculo de errores .....	304

6.8	Comparación con otros métodos .....	305
6.9	Conclusiones.....	307
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>311</b>
7.1	Caracterización geotécnica de las unidades involucradas en el proyecto .....	311
7.2	Grado de caracterización de cada unidad .....	312
7.3	Nueva metodología para la interpretación de ensayos presiométricos en medios con anisotropía transversal por fisuración .....	313
<b>8.</b>	<b>FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y RECOMENDACIONES AL PROYECTO.....</b>	<b>317</b>
8.1	Futuras líneas de investigación.....	317
8.2	Recomendaciones al proyecto.....	318
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>321</b>
	<b>INDICE DE TABLAS .....</b>	<b>335</b>
	<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>343</b>
	<b>APÉNDICE I: CORRELACIONES PARA LA ESTIMACIÓN DEL MÓDULO DE DEFORMACIÓN EN MACIZOS ROCOSOS .....</b>	<b>355</b>
	<b>APÉNDICE II: DATOS EMPLEADOS EN EL ESTUDIO ESTADÍSTICO.....</b>	<b>385</b>
	<b>APÉNDICE III: ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....</b>	<b>407</b>
	<b>APÉNDICE IV: RESUMEN DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS .....</b>	<b>459</b>
	<b>APÉNDICE V: EJEMPLO DE PROGRAMA DE CÁLCULO UTILIZADO EN 3DEC .....</b>	<b>465</b>
	<b>APÉNDICE VI: CÁLCULOS REALIZADOS CON EL MODELO 3DEC .....</b>	<b>473</b>



# RESUMEN

En esta tesis doctoral se estudia, desde diferentes puntos de vista, el comportamiento geotécnico de los materiales geológicos existentes en el área del estrecho de Gibraltar y que afectan al proyecto de enlace fijo entre Europa y África cruzando este accidente geográfico.

El proyecto actual prevé la realización de un túnel de unos 28 km, entre las regiones de Algeciras (España) y Tánger (Marruecos), que será excavado, en materiales complejos desde el punto de vista geotécnico, bajo zonas con más de 300 m de columna de agua. Este hecho lo convierte en uno de los túneles más complejos de realizar de cuantos se han planteado.

## **Contexto geológico**

Los materiales atravesados por el futuro túnel se encuadran en el Surco de los Flysch (uno de los dominios que constituyen la Cordillera Bética) y están formados por varias unidades de naturaleza turbidítica que presentan continuidad en ambas orillas del Estrecho. Las principales unidades son: a) Unidad de Algeciras (*Beni-Ider*) de edad Cretácico superior-Mioceno y formada por diferentes alternancias de argilitas, areniscas y calcarenitas; b) Unidad de Bolonia (*Tala Lakrah*) de edad Cretácico superior-Aquitaniense y de naturaleza similar a la unidad de Algeciras; c) Unidad de Facinas (*Melloussa*) de edad Albiense-Aptiense al Cenomaniense-Paleoceno y formada por arcillas violáceas y verdes, en las que se intercalan delgados niveles de cuarzoareniscas de grano muy fino; y d) Unidad de Almarchal (*Tanger*) de edad Campaniense-Maestrichtiense y formada, principalmente, por arcillas y margas esquistosas grisáceas con intercalaciones de calcarenitas.

En las investigaciones realizadas se han localizado, en la zona central de la traza del futuro túnel dos paleocanales rellenos por diferentes materiales cuaternarios formando la siguiente sucesión tipo: a) Calizas litohérmicas; b) Conglomerados basales litobioclásticos; c) Arenas litobioclásticas; y d) Brechas arcillosas compuestas por clastos heterométricos, que llegan a superar el metro de diámetro, dispuestos de forma caótica y provenientes de las unidades de flysch circundantes.

## **Recopilación de datos geotécnicos**

El proyecto de enlace fijo, que lleva ideándose desde comienzos del siglo XX, tomó un gran impulso a comienzo de los años 80 con la creación de dos sociedades nacionales: SECEG, por parte española y SNED, por parte marroquí. En estos más de 30 años se han realizado numerosas campañas de investigación geológico-geotécnica en las que se han generado un gran número de datos geotécnicos provenientes de ensayos de campo y laboratorio.

En esta tesis se han revisado y analizado más de 600 documentos de índole geológico-geotécnico. De estos documentos se han recogido, homogeneizado y ordenado más de 420 resultados de ensayos *in situ*, más de 4700 ensayos de laboratorio e información proveniente de los más de 7000 m de sondeos que se han perforado tanto en el fondo del Estrecho como en sus dos orillas. Caben destacar los datos proporcionados por las tres obras singulares realizadas en el marco de este proyecto: Pozo de Bolonia, Galería de Tarifa y Pozos y galerías de Malabata. La unión de todos estos datos en un solo documento supone una revalorización de los mismos, permitiendo la realización de los siguientes estudios que desarrolla esta tesis doctoral.

### **Campaña CEDEX-SECEG 2012**

A los datos recopilados se le unen los realizados, ya durante la realización de esta tesis, en la campaña geotécnica CEDEX-SECEG 2012. Esta campaña incluyó la realización de sondeos, ensayos *in situ* y ensayos de laboratorio en los materiales de la unidad de Algeciras atravesados por la Galería experimental de Tarifa.

Los ensayos *in situ* se basaron en técnicas presiométricas convencionales y a partir de ellos se obtuvo una buena correlación entre la deformabilidad *in situ* y las condiciones geomecánicas del macizo medidas a través del RMR. En el laboratorio se realizaron más de 600 ensayos con los que se analizó la anisotropía de la roca matriz y cómo la dirección de aplicación de las cargas influye en los parámetros medidos. En estos ensayos se observó una importante influencia de la humedad de las muestras, tanto en resistencia como en deformabilidad.

### **Análisis estadístico y caracterización geotécnica**

Con todos los datos recopilados y los obtenidos en la nueva campaña se ha realizado una caracterización geotécnica de los diferentes materiales. Para este fin se emplearon técnicas estadísticas.

Los datos recopilados, una vez filtrados y clasificados, fueron agrupados en poblaciones homogéneas (dentro de las posibilidades de este tipo de materiales). Estas poblaciones se analizaron a fin de obtener sus parámetros estadísticos (media, desviación típica, coeficiente de variación, etc.). Posteriormente, basándose en el Teorema Central de Límite, se obtuvo, para cada población, un rango de variación de la media con una confianza del 90 % siguiendo las recomendaciones dadas por el Eurocódigo. Mediante estos rangos de confianza se ha podido, para cada parámetro en cada unidad geotécnica, obtener un valor característico que puede ser utilizado en la optimización de la solución constructiva final que se aplique en el proyecto de enlace.

De manera general, con este estudio se puede concluir que las unidades que cuentan con peores características geotécnicas son las Brechas cuaternarias y la unidad de Almarchal, siendo las unidades de Algeciras y Bolonia las más favorables. Es destacable también la detección del carácter expansivo de las arcillas de las unidades de Algeciras, Almarchal y Facinas.

Contar con estos parámetros característicos permite una menor incertidumbre en los cálculos y una comparación más precisa y ajustada a la realidad de las diferentes alternativas de diseño.

### **Determinación del grado de caracterización de cada unidad**

Los cerca de 100 parámetros estudiados cuentan con diferentes grados de determinación. Bien sea por el diferente número de datos con los que se cuenta, por la calidad de los mismos o por otros factores, no todos ellos presentan la misma certidumbre. Este aspecto es de suma importancia a la hora de planificar futuras campañas de reconocimiento. Dado que la zona de estudio es de extremadamente difícil acceso, una adecuada planificación de los trabajos es de suma importancia.

Para este fin se ha desarrollado un método para la determinación del grado de caracterización de cada parámetro basado en la cuantificación de siete parámetros: número de datos, variabilidad o bondad del ajuste a una función estadística determinada, número de proyectos en los que se ha medido el parámetro, número de localizaciones en las que se han tomado muestras, calidad de la descripción de los ensayos, calidad de la descripción de las muestras y metodología empleada en la toma de las mismas. En base a estos se ha puntuado, entre -10 y +10, el grado de determinación de cada parámetro permitiendo, de una manera rápida, establecer objetivos, con un criterio técnico no arbitrario, para las futuras campañas, optimizando así recursos y permitiendo un mejor aprovechamiento de los datos obtenidos.

De esta parte de la tesis cabe destacar que las unidades de Almarchal y Algeciras son las más y mejor caracterizadas, mientras que la unidad de Facinas y las arenas bioclásticas son los materiales menos caracterizados. También se ha detectado una escasa caracterización de todos los materiales a escala de macizo y la inexistencia de datos sobre el estado tensional existente bajo el Estrecho. Todos estos aspectos deberían ser tenidos en cuenta en las futuras investigaciones que se planifiquen.

### **Nueva metodología para obtener la deformabilidad en un medio anisótropo discontinuo**

Otra forma de optimizar las campañas de reconocimiento es la mejora en las técnicas empleadas para este fin. Dada la localización de la traza del proyecto (su carácter submarino y profundo), las técnicas presiométricas, por emplearse en el interior de sondeos, parecen ser las más indicadas para la determinación de las propiedades deformacionales y resistentes de estos materiales geológicos en condiciones *in situ*. Estas técnicas se basan normalmente en el análisis de la deformabilidad de una cavidad cilíndrica en un medio isótropo y continuo. Sin embargo, en las litologías estudiadas se ha observado un comportamiento anisótropo determinado, en su mayor parte, por la presencia de planos de discontinuidad de génesis sedimentaria.

En su mayor parte, los materiales involucrados por este proyecto son, por tanto, anisótropos y discontinuos. En esta tesis se ha analizado el comportamiento de una cavidad cilíndrica en este tipo de medios.



En primer lugar se han recopilado aquellas metodologías de interpretación de ensayos presiométricos en medios anisótropos y se ha observado que estas basan sus análisis en medios continuos y la mayoría son solamente aplicables para geometrías concretas, en su mayoría para ejes de anisotropía orientados a 0 o 90° respecto al sondeo. Por tanto, se ha visto la necesidad de comprobar si son aplicables al tipo de material con el que se trabaja aquí.

Para ello se han realizado diferentes modelos informáticos, tanto en dos como en tres dimensiones, para comparar los resultados obtenidos mediante ensayos presiométricos entre los medios discontinuos y los medios continuos equivalentes. En esta comparación se ha observado una gran importancia en los resultados, de la relación entre el espaciado de las discontinuidades ( $\lambda$ ) y el radio de la cavidad o sondeo ( $R_0$ ). Para relaciones de  $\lambda/R_0$  menores a 0,4 ambos modelos son equivalentes mientras que para valores superiores ambos modelos divergen de manera notable.

Se ha observado que con perforaciones realizadas cortando las capas con ángulos inferiores a un ángulo crítico ( $\chi$ ), siendo  $\chi = \arcsin(\lambda/R_0)$  y con  $\lambda/R_0$  mayores a 0,4, se produce un deslizamiento de las discontinuidades que produce un importante desvío de los resultados respecto a los teóricos esperados en un medio continuo. Este fenómeno no es tenido en cuenta por ninguno de los métodos recogidos en la literatura.

A la vista de estos datos se optó por el desarrollo de un método de interpretación de ensayos presiométricos basado en un modelo tridimensional discontinuo que incorporara las propiedades geotécnicas de las discontinuidades. Este modelo incorpora las propiedades geotécnicas obtenidas con anterioridad para los materiales arcillosos de la unidad de Algeciras por ser estos uno de los más afectados por el proyecto del túnel.

Con el análisis de estos modelos se han propuesto unas ecuaciones empíricas que permiten la obtención de los módulos de deformación máximo (coincidente con la dirección paralela a los planos de discontinuidad) y mínimo (coincidente con la dirección perpendicular a estos) y en función del ángulo en el que los planos son cortados por el sondeo.

Empleando la metodología propuesta, se han calculado errores máximos en la obtención de los módulos inferiores al 20 % en el caso del módulo máximo e inferiores al 60 % en el módulo mínimo. Estos errores son asumibles dado el carácter heterogéneo de estos materiales, sobre todo en fases de estudio preliminares como en las que se encuentra el proyecto.

# ABSTRACT

## **Introduction**

In this Ph.D. Thesis it is studied, from different points of view, the geotechnical behaviour of the geological materials of the Strait of Gibraltar area, which affect the Project of the fixed link between Europe and Africa crossing this landform.

The current Project foresees the execution of a tunnel 28 km long, between the areas of Algeciras (Spain) and Tanger (Morocco), which will be excavated beneath zones with more than 300 m of water column in complex materials from a geotechnical point of view, becoming one of the most complex tunnels that have been proposed.

## **Geological Context**

The materials crossed by the future tunnel are framed in the Surco de los Flysch (one of the domains that constitute the Baetic range). They are composed of several turbiditic units that have continuity in both sides of the Strait. The major units are: a) Algeciras Unit (Beni-Ider), from Upper Cretaceous-Miocene, composed of alternate layers of argillites, sandstones and calcarenites; b). Bolonia Unit (Tala Lakhra), from Upper Cretaceous-Aquitania and of similar nature than the Algeciras Unit; c). Facinas Unit (Melloussa), from Albian-Aptian to Cenomanian-Paleocene, constituted by purple and green clays with thin layers of fine-grained quartz sandstones interbedded; and d). Almarchal Unit (Tanger), from Campanian-Maastrichtian, consisting mainly of clays and grey schistose marls with interbedded calcarenites.

In the research performed, it has been located, in the central area of the future tunnel trace, two paleochannels filled with different quaternary materials constituting the following succession: a). lithohermic limestones; b). basal litho-bioclastic conglomerates; c). lithobioclastic sands; and d). Clay breccias composed of heterometric clasts, which can reach over one metre in diameter, disposed in a chaotic way and coming from the surrounding flysch units.

## **Compilation of geotechnical data**

The fixed link Project, which has been developing since early 20th Century, took a great impulse at the beginning of the 80s with the foundation of two national societies: SECEG, on the Spanish side, and SNED, on the Moroccan. In these more than 30 years, several campaigns have been performed, with the generation of a great amount of geotechnical data coming from field and laboratory tests.

In this Ph.D. Thesis more than 600 documents of geological-geotechnical nature have been reviewed and analysed. From these documents, more than 420 results of in situ tests, 4700 laboratory tests, and information coming from more than 7000 m of boreholes drilled both in the bottom of the Strait and in both sides have been collected, homogenized and sorted. Attention should be drawn to the data provided by the three singular works performed in the frame of this project: the Shaft of Bolonia, the Experimental Gallery of Tarifa, and the Shaft and Galleries of Malabata. The combination of all these data in one document involves a revaluation of them, allowing the materialization of the following studies, developed in this Ph.D. Thesis.

### **CEDEX-SECEG 2012 Testing Campaign**

In addition to the compiled data, this Thesis also considers the data coming from tests performed during its materialization, in the CEDEX-SECEG 2012 geotechnical campaign. This campaign included the realization of boreholes, in situ tests and laboratory tests in the Algeciras Unit materials crossed by the Experimental Gallery of Tarifa.

In situ tests were based on conventional pressiometric techniques, and, from them, it has been obtained a good correlation between in situ deformability and geomechanical conditions of the rock massif through RMR. On laboratory, more than 600 tests were carried out, with which the anisotropy of the rock matrix and how the direction of application of the loads affects the measured parameters were analysed. In these tests it was observed an important influence of the water content of the samples, both in strength and deformability.

### **Statistical analysis**

With all the data compiled and those obtained in the new campaign it has been made a geotechnical characterization of the different materials. Statistical techniques were used for this purpose.

The data compiled, once filtered and classified, were grouped in homogenous populations (within the possibilities of this kind of materials). These populations were analysed with the purpose of obtaining their statistical parameters (mean, standard deviation, coefficient of variation, etc.). Subsequently, basing on the Central Limit Theorem, it was obtained, for each population, a range of variation of the mean with 90 % of confidence, following the recommendations given by the Eurocodes. Through these confidence ranges it could be obtained, for each parameter of each geotechnical unit, a characteristic value which can be used for the optimisation of the final constructive solution applied in the link project.

In a general way, it can be concluded with this study that the units that present worse geotechnical characteristics are the quaternary breccias and the Almarchal Unit, being the Algeciras and Bolonia Units the most favourable. It is noteworthy the detection of the swelling behaviour of the clays of the Algeciras, Almarchal and Facinas Units.

Having these characteristic parameters enables a lower uncertainty in calculations and a more accurate comparison, more adjusted to the reality of the different design alternatives.

### **Establishment of the degree of characterization of each unit**

The nearly 100 parameters studied present different degrees of determination. Either due to the different amount of data available, or due to their quality or other factors, not all of them show the same certainty. This is an aspect of capital importance when planning future testing campaign. Given that the area of study has an extremely difficult access, an adequate planning of the works becomes of great importance.

For this purpose, it has been developed a method for the determination of the degree of characterization of each parameter based on the quantification of seven parameters: amount of data, variability or goodness of fit to a given statistical function, amount of projects where the parameter has been measured, number of locations where samples have been taken, quality of the description of tests, quality of the description of samples, and methodology used in sampling. Basing on this, it has been punctuated, in a range of -10 to +10, the degree of determination of each parameter allowing, rapidly, establishing goals, with a non-arbitrary technical criterion, for future campaigns, optimizing resources this way and allowing a better use of the obtained data.

In this part of the Thesis it can be highlighted that the Almarchal and Algerciras units are the best characterized of all the studied materials while the Facinas Unit and Bioclastic Sands are the worst characterized. It may be also noted that there is a generalized bad characterization of all units at rock mass scale and the absence of data about the tensional state of stress at the bottom of the Strait of Gibraltar.

### **Pressuremeter tests in anisotropic and discontinuous media**

Another way to optimize the testing campaigns is to improve the testing methodologies. Given the location of the trace of the projected tunnel (in a submarine and deep zone), pressiometric techniques— to be carried out within a borehole—seem to be the most suitable testing method for the determination of strength and deformability of the studied geological materials in its in-situ conditions. The interpretation of these tests are based (in most occasions) on the analysis of the deformability of a cylindrical cavity in a continuous, isotropic and homogeneous medium. However, the units studied in this Thesis show an anisotropic behaviour mainly due to the presence of discontinuity planes of sedimentary origin.

Therefore, most of the involved lithologies studied here are anisotropic and discontinuous media. In this Thesis, the behaviour of a cylindrical cavity under an expansion test has been analysed.

First, published methodologies about the interpretation of pressuremeter tests in an anisotropic medium have been collected for the establishment of the “state of the art” of the matter. These methodologies are based on the analysis of continuous media and, most of them, are only applicable in certain angles of orientation between the axis of the borehole and the planes of anisotropy (normally 0 or 90°). In view of this “state of the art”, the need for proving if these techniques are applicable for the material studied in this Thesis has been found.

For this purpose, several informatics models have been developed—in two dimensions using Phase2 of Rocscience software and in three dimensions using 3DEC of Itasca—in order to compare the results obtained in one pressuremeter test carried out in an anisotropic and discontinuous medium, and one test carried out in the equivalent continuum medium. With this comparison, it has been detected a great influence of the ratio between the discontinuities

spacing ( $\lambda$ ) and the initial radius of the borehole ( $R_0$ ): for a value of  $\lambda/R_0$  less than 0.4, both results from continuous and discontinuous models are quite similar; while for  $\lambda/R_0$  greater than 0.4 both models present very different results.

When the angle between the axis of the borehole and the normal vector to the discontinuity planes is greater than a critical value ( $\chi$ ) and the ratio  $\lambda/R_0$  is greater than 0.4, a slide of the discontinuities occurs. The critical angle ( $\chi$ ) is given by  $\chi = \arcsin(\lambda/R_0)$ . This slide produces an important deviation from the theoretical deformation of a cylindrical cavity in a continuous medium. This phenomenon is not taken into account by any of the collected method.

Given this observed behaviour, a new method for the interpretation of pressuremeter tests carried out in laminated rock masses has been developed. The development has been based on the analysis of a three-dimensional and discontinuous model that incorporates the mechanical properties of the intact rock and the discontinuity planes. This model has been created considering the properties of the clayey lithologies of the Algeciras Unit since these portions are the most affected by the project of the tunnel.

In the basis of the analysis of the deformation of the models, several empirical equations have been proposed for the estimation of the deformational properties of these kind of rock masses (maximum and minimum modulus) based on the results of a pressuremeter test. These equations can be used for any dip of the discontinuity planes.

Using the proposed methodology, the calculated errors in the estimation of the modulus have been less than 20 %, in the case of the maximum modulus (in parallel direction to the planes of discontinuity), and less than 60 % in the case of the minimum modulus (in perpendicular direction to the planes of discontinuity). The precision obtained using the proposed method is acceptable given the special characteristics of these geological materials, especially for the preliminary stage, which is the current stage of the project.

# SÍMBOLOS

Abs	Absorción
E	Módulo de deformación
$E_C$	Módulo de deformación del macizo rocoso
$E_{dyn}$	Módulo de deformación dinámico
$E_i$	Módulo de deformación de la roca matriz
$E_P$	Módulo presiométrico
$E_R$	Módulo de deformación en un ciclo descarga-recarga
$E_{0^\circ}$	Módulo de deformación del macizo en dirección paralela a las discontinuidades
$E_{90^\circ}$	Módulo de deformación del macizo en dirección perpendicular a las discontinuidades
$G_C$	Módulo de deformación tangencial del macizo rocoso
$G_I$	Módulo de deformación tangencial de la roca matriz
$G_S$	Peso específico de las partículas sólidas
$I_{S50}$	Índice de carga puntual
$k_n$	Rigidez normal de una discontinuidad
$k_s$	Rigidez transversal de una discontinuidad
$m_i$	Constante del criterio de rotura de Hoek y Brown dependiente del tipo de roca
n	Número de datos de una muestra
	Porosidad
$P_f$	Presión de fluencia en un ensayo presiométrico
$P_L$	Presión límite en un ensayo presiométrico
Q	<i>Rock Quality Index</i>
R	Radio de una cavidad cilíndrica
$R_m$	Radio medio de una cavidad cilíndrica
$R_0$	Radio inicial de una cavidad cilíndrica
$R_\theta$	Radio de una cavidad cilíndrica medido en un ángulo $\theta$ respecto a la dirección de los planos de discontinuidad
$S_R$	Grado de saturación

$V_p$	Velocidad de transmisión de las ondas longitudinales o “p”
$V_s$	Velocidad de transmisión de las ondas transversales o “s”
$x$	Valor
$\bar{x}$	Valor medio de una población
$X_K$	Valor característico
$X_{K,inf}$	Valor característico inferior
$X_{K,sup}$	Valor característico superior
$\alpha$	Coefficiente reológico de Menard Error estadístico ( $1-\alpha$ )
$\beta$	Ángulo de buzamiento
$\Gamma$	Parámetro empírico de anisotropía
$\gamma$	Peso específico
$\gamma'$	Peso específico sumergido
$\gamma_{ap}$	Peso específico aparente
$\gamma_d$	Peso específico seco
$\gamma_m$	Coefficiente de seguridad parcial
$\gamma_s$	Peso específico de las partículas sólidas
$\gamma_{sat}$	Peso específico saturado
$\Delta R_\theta$	Variación del radio de una cavidad cilíndrica en un ángulo $\theta$
$\Delta R_{0^\circ}$	Variación del radio de una cavidad cilíndrica en dirección paralela a las capas
$\Delta R_{90^\circ}$	Variación del radio de una cavidad cilíndrica en dirección perpendicular a las capas
$\Delta R_\chi$	Salto producido en la curva “ $\Delta R-\theta$ ”
$\theta$	Ángulo entre la dirección de medida en una cavidad radial y la dirección de los planos de discontinuidad
$\lambda$	Espaciado de las discontinuidades Parámetro de Lamé
$\mu$	Valor medio de la población
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\rho$	Densidad

$\sigma$	Tensión normal
	Desviación típica
$\tau$	Tensión tangencial
$\upsilon$	Coefficiente de variación de la población
$\phi$	Ángulo de rozamiento interno
$\chi$	Ángulo crítico en expansión de cavidad cilíndrica en medio fisurado
$\omega$	Humedad



# ABREVIATURAS

AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
EC-7	Eurocódigo 7
FC	Flysch calcáreo de la Unidad de Algeciras
FMAM	Flysch margo-areniscoso-micáceo de la Unidad de Algeciras
GM	Grado de meteorización
GSI	<i>Geological Strength Index</i>
IP	Índice de Plasticidad
ISRM	<i>International Society for Rock Mechanics</i>
ISSMGE	<i>International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering</i>
NLT	Norma del Laboratorio del Transporte
PR	Pelitas Rojas en la Unidad de Algeciras
RCS	Resistencia a compresión simple
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>
RMRb	<i>Rock Mass Rating</i> básico
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>
RTI	Resistencia a tracción indirecta
SECEG	Sociedad Española de Estudios para la Comunicación Fija a través del Estrecho de Gibraltar, S.A.
SNED	<i>Société Nationale d'Études du Déroit de Gibraltar</i>
UTM	Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**



# 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

---

## 1.1 Introducción

El proyecto de enlace fijo entre Europa y África a través del estrecho de Gibraltar ha sido durante más de un siglo uno de los proyectos más ambiciosos de la ingeniería civil española e internacional.

El primer informe oficial sobre este proyecto fue presentado por el Consejo de Obras Públicas del Ministerio de Fomento de España durante el Gobierno Provisional del general Prim, en 1869.

García Faría (1906) señalaba, ya en 1906 la dificultad de este preyecto: “[...] *Al llegar a este punto se presenta la primera y más grave dificultad del trazado, el paso del Estrecho, esta obra, hoy sin duda alguna la más difícil de orbe, es realizable técnicamente, pero no podemos olvidar que para ejecutarla han de resolverse previamente una porción de transcendentales problemas de ingeniería [...].*

Con posterioridad se han propuesto numerosas soluciones técnicas para este enlace. Las principales han sido: el túnel excavado (Figura 1-1), con proyectos destacados como los de Carlos Ibáñez de Ibero en 1908 (Ibáñez de Ibero, 1952) o Pedro Jevenois (1927); el túnel sumergido, destacando los proyectos de Fernando Gallego Herrera (1929); y el puente suspendido, con proyectos como el de Alfonso Peña Boeuf (1956). Otras propuestas incluyen, por ejemplo, una presa-puente que cerraría el mar Mediterráneo (Soergel, 1929).

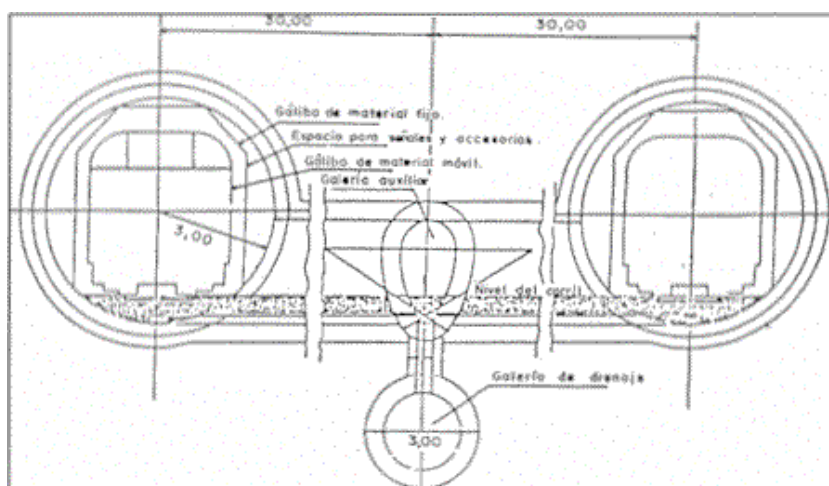


Figura 1-1. Sección transversal de la solución puente propuesta por Jevenois (1927).

Este proyecto es “olvidado” por los diferentes gobiernos hasta que, en 1972, se crea por parte del Ministerio de Obras Públicas de España una comisión para “*elaborar las condiciones y el programa a que deberán ajustarse los estudios sobre viabilidad técnica, económica y financiera del establecimiento de una instalación permanente, apta para el transporte de personas y mercancías entre España y África a través del Estrecho de Gibraltar*” (SECEG, 1984).

En 1979 se firma un acuerdo entre los reinos de España y Marruecos para el desarrollo conjunto de este proyecto. De este acuerdo surgirán dos sociedades públicas: la Sociedad Española para la Comunicación Fija a través del Estrecho de Gibraltar (SECEG) por parte de España, y la *Société Nationale d'Études du Détroit de Gibraltar* (SNED) por la de Marruecos.

Tras los primeros estudios se observó que la topografía del Estrecho condicionaría en gran medida el trazado del enlace (Figura 1-2). El trazado más corto para el paso del Estrecho, con unos 14 km es el denominado Cañón del Estrecho. Este trazado corta dos cañones submarinos que alcanzan más de 900 m de profundidad impidiendo el apoyo de cualquier tipo de puente y obligando a un posible túnel a aumentar su longitud en varias decenas de kilómetros para poder alcanzar tal profundidad manteniendo las pendientes máximas permitidas. La alternativa a este trazado, y que finalmente se adoptó como base para los siguientes pasos del proyecto, fue la del Umbral del Estrecho (o de Camarinal). Esta traza duplica el tramo submarino (unos 28 km) pero presenta una profundidad máxima de unos 300 m.

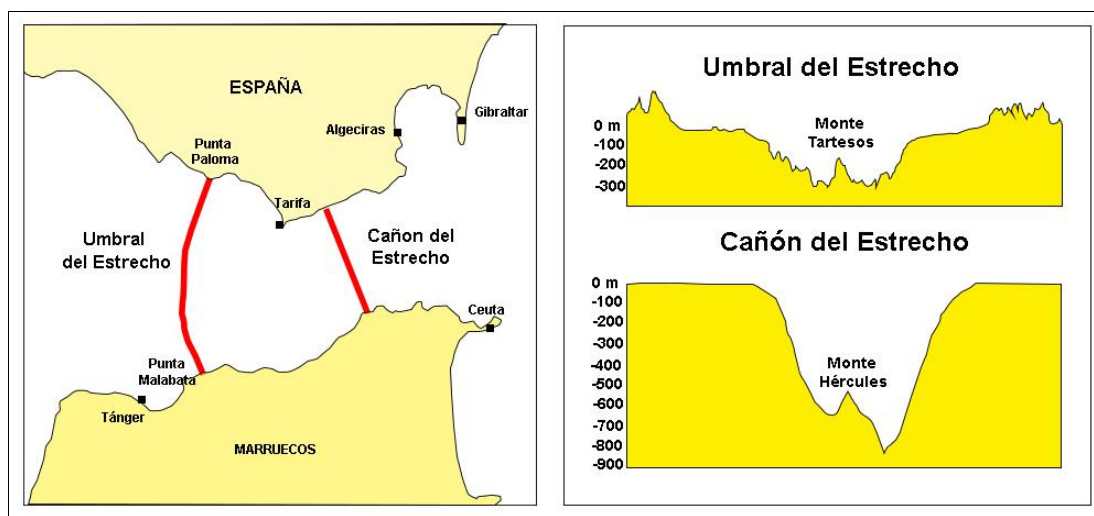


Figura 1-2. Diferentes alternativas de trazado contempladas en los primeros estudios del proyecto.

También en estos primeros años del proyecto se concluyó que el Enlace debería realizarse mediante un túnel excavado o mediante un puente suspendido. En 1995 se optó por la solución de doble túnel excavado (Figura 1-3). Actualmente, dado el avance experimentado por la ingeniería de estructuras y materiales, se ha vuelto a tomar en consideración la solución puente.

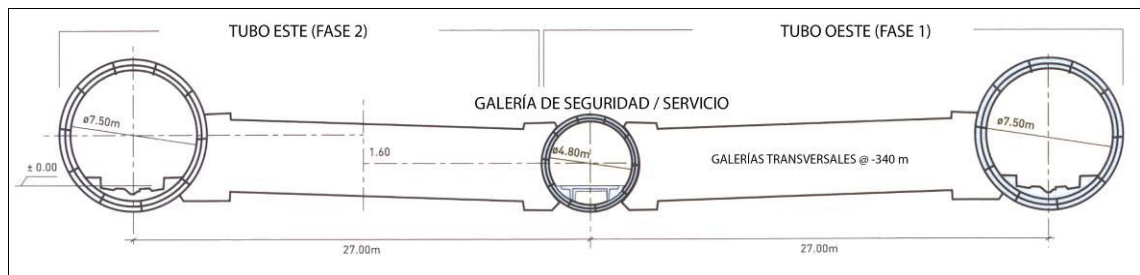


Figura 1-3. Sección transversal del túnel excavado propuesto (modificado de SECEGSA, 1996).

Durante los años en los que el proyecto lleva desarrollándose se ha generado un gran número de datos de diferente índole, destacando un profundo estudio geológico de la zona. También han sido muchos los datos de carácter geotécnico que se ha ido generando una gran cantidad de datos durante numerosas campañas geotécnicas, muchas de las cuales fueron realizadas de manera independiente por diferentes organismos. Esto ha propiciado que la información geotécnica no haya sido estudiada en conjunto y que, por tanto, no se le haya sacado todo el provecho posible.

Siguiendo las tendencias actuales en el ámbito geotécnico del uso creciente de técnicas estadísticas para la estimación de parámetros (véanse por ejemplo los Eurocódigos), en esta tesis doctoral se propone analizar los datos existentes, una vez recopilados, a fin de determinar las propiedades geotécnicas de cada uno de los tipos rocosos involucrados en el Enlace Fijo. Este análisis permitirá revalorizar datos poco aprovechados, obtener los parámetros representativos de cada material y tener una visión global del grado de caracterización de cada unidad.

El conocimiento del grado de caracterización de cada unidad permitirá la optimización de las próximas campañas de investigación, que deberán centrarse en aquellos parámetros menos conocidos o en aquellos más problemáticos. Las campañas de investigación en el Estrecho son sumamente difíciles y costosas debido, en parte, a las fuertes corrientes reinantes así como las profundidades del fondo marino que llegan hasta casi los 1000 m. Unido a esto, existe una importante heterogeneidad litológica y estructural en el sustrato rocoso.

Estas condiciones hacen que la realización de ensayos *in situ* sea compleja y deba de restringirse, al menos hasta que exista algún tipo de túnel piloto, a ensayos ejecutables en el interior de sondeos. Dentro de este tipo de ensayos, el ensayo presiométrico permite la obtención de parámetros resistentes y deformacionales *in situ* a cualquier profundidad. Sin embargo, la interpretación convencional de este ensayo se basa en la suposición de isotropía y homogeneidad del material ensayado. En esta tesis doctoral se pretende ampliar el uso de esta técnica a materiales estratificados y anisótropos como los existentes en el fondo del estrecho de Gibraltar.

## 1.2 Objetivos

El principal objetivo de esta tesis doctoral es el avance en el conocimiento geotécnico de los materiales involucrados en el proyecto de enlace fijo entre Europa y África a través del estrecho de Gibraltar, a fin de aportar datos objetivos que permitan una correcta y optimizada planificación de los futuros trabajos de investigación geotécnica de este proyecto.

Para la consecución de estos objetivos generales se han planteado varios objetivos parciales que serán alcanzados en diferentes capítulos de esta tesis doctoral. Estos objetivos parciales son:

- Recopilación, filtrado y análisis de todos aquellos datos de índole geotécnica generados a lo largo de los más de 30 años que lleva en desarrollo el proyecto.
- Realización de una campaña de investigación geotécnica propia (ensayos de campo y de laboratorio) que permita aumentar el número de datos disponibles.
- Obtención, a partir de estos datos, de parámetros estadísticos representativos de las diferentes unidades involucradas.
- Determinación del grado de caracterización geotécnica de cada unidad con un criterio único y objetivo.
- Identificación de los puntos débiles de la caracterización geotécnica.
- Recopilación y análisis de los diferentes métodos existentes para la interpretación de ensayos presiométricos en materiales anisótropos.
- Propuesta de una nueva metodología para la interpretación de ensayos presiométricos en materiales anisótropos discontinuos.

## 1.3 Estructura de la tesis

La memoria de esta tesis doctoral se ha dividido en cuatro bloques:

- **Bloque 1:** Comprende los capítulos 1 (Introducción y objetivos) y 2 (Contexto geológico). Este bloque pretende situar al lector en la materia a tratar, introduciendo aquellos datos necesarios para la comprensión del resto del texto. Además, se describe las principales unidades geológicas presentes en el estrecho de Gibraltar.
- **Bloque 2:** Comprende los capítulos 3 (Recopilación de datos geotécnicos previos), 4 (Nueva campaña CEDEX-SECEG 2012) y 5 (Caracterización geotécnica). En este bloque se han recogido todos aquellos datos de carácter geotécnico considerados de importancia en el proyecto de enlace fijo. Estos datos se han analizado estadísticamente, obteniéndose parámetros índice directamente utilizables en el proyecto. Además, se ha analizado el grado de caracterización de cada unidad con el fin de ayudar a la planificación de futuras campañas de reconocimiento.
- **Bloque 3:** Formado por el capítulo 6 (Metodología para la caracterización deformacional de un macizo rocoso anisótropo mediante técnicas presiométricas). En este apartado se analizan las metodologías existentes para la interpretación de ensayos presiométricos en medios anisótropos y se propone, en base a las simulaciones realizadas, una nueva metodología de interpretación más adecuada para los materiales estudiados.

- **Bloque 4:** Formado por los capítulos 7 (Conclusiones) y 8 (Futuras líneas de investigación y recomendaciones al proyecto). En este bloque se destacan los aspectos más relevantes del trabajo realizado y se resaltan aquellos aspectos que presentan un especial interés para su estudio en posteriores trabajos.

Los aspectos teóricos y metodológicos de los diferentes temas abordados en este trabajo, no se han agrupado en un capítulo independiente sino que se han recogido en cada uno de los capítulos a los que hacen referencia. De este modo los capítulos pueden funcionar de manera independiente, simplificando la utilización del texto a modo de consulta.





## **CAPÍTULO 2**

## **CONTEXTO GEOLÓGICO**



## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO

### 2.1 Localización

La zona de estudio se localiza en el área del estrecho de Gibraltar; concretamente entre los municipios de Tarifa y Algeciras (orilla Norte), y las regiones de Tánger, Ceuta y Tetuán (orilla Sur), así como en el territorio existente entre ambas orillas, sumergido y ocupado por las aguas del Estrecho (Figura 2-1).



Figura 2-1. Mapa esquemático de situación de la zona de estudio.

## 2.2 Antecedentes

El primer estudio importante sobre la geología del área del estrecho de Gibraltar fue el Mapa geológico de la provincia de Cádiz a escala 1:200.000 (Gavala, 1924).

Años más tarde, con la tesis doctoral del francés Didon (1969) se produce un gran avance en el conocimiento de los flyschs del Campo de Gibraltar. En esta tesis se reconoce el apilamiento de varias unidades alóctonas sobre el autóctono relativo constituido por la unidad de Almarchal. También se realizó una cartografía geológica a escala 1:50.000.

Tras el trabajo de Didon, fueron varios los estudios geológicos realizados por autores franceses. En 1972, la *Société Géologique de la France* celebró una reunión extraordinaria en la que se realizaron varias excursiones para el reconocimiento de las unidades de ambas orillas del Estrecho.

Como resultado de los trabajos de cartografía geológica realizados a ambos lados del estrecho, Didon *et al.* (1973) establecieron la aloctonía de todos los terrenos aflorantes y la homología geológica entre las dos orillas.

A partir de principios de los años 80, con la creación de las sociedades SECEG y SNED, los estudios asociados al Proyecto de Conexión fija entre Europa y África a través del estrecho de Gibraltar son los principales propulsores del conocimiento geológico de la zona, llegando a realizar, entre otros muchos trabajos, una cartografía geológica a escala 1:25.000 (SECEG, 2003), editado a 1:100.000 (SECEG, 1998) con una reedición revisada (SECEG, 2008); un mapa tectónico del Arco de Gibraltar a escala 1:500.000 (SECEG, 1990) y numerosos trabajos de síntesis (SECEG, 1981; Esteras Martín, 1982; Esteras Martín *et al.*, 2004). Estos trabajos son los que, principalmente, han servido de base para la realización de este capítulo.

## 2.3 Geología Regional

La zona de estudio se encuadra dentro de uno de los dominios que constituyen la Cordillera Bética.

Esta cordillera se divide en tres grandes grupos de unidades geológicas (Figura 2-2): a) Dominio de Alborán o Zonas Béticas Internas (incluyendo los flyschs predorsales), b) Dominios Sudibérico y Magrebí o Zonas Béticas Externas y c) Complejo del Surco de los Flyschs, situado paleogeográficamente entre los anteriores. Dentro de esta división, la zona estudiada se encuadra dentro de las unidades de flyschs del Campo de Gibraltar (Figura 2-3), que junto con sus equivalentes en el Norte de África conforman el Complejo del Surco de los Flyschs.

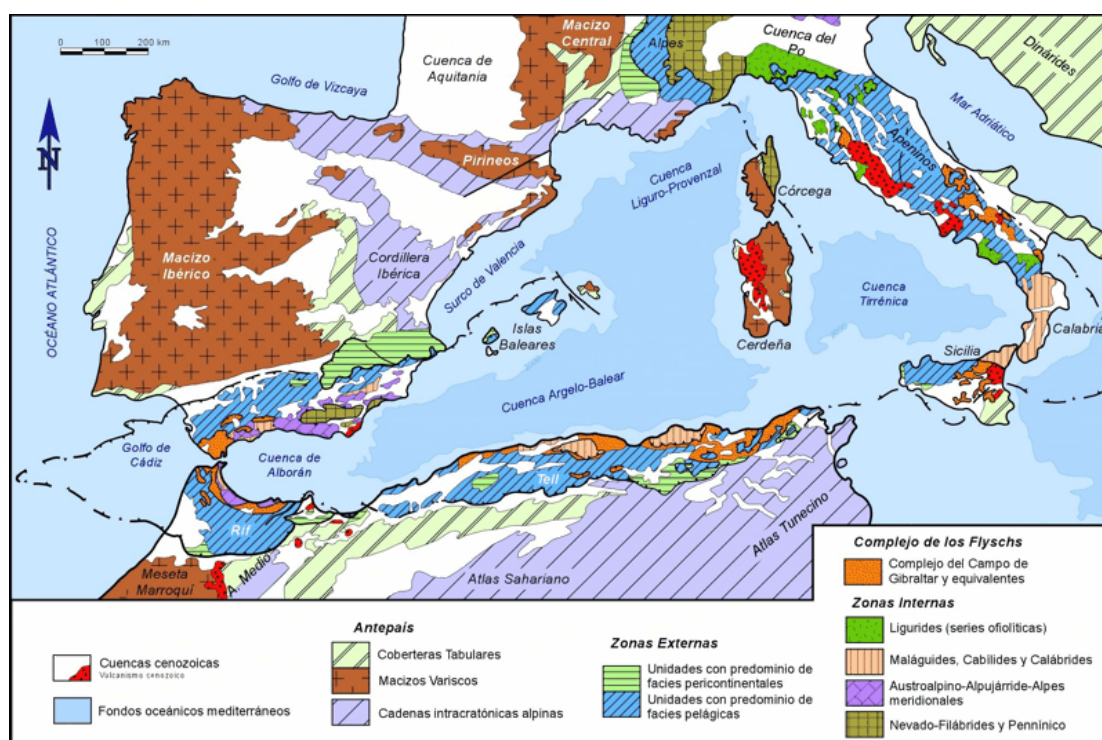


Figura 2-2. Mapa geológico del segmento occidental del Orógeno Alpino Perimediterráneo (Vera Torres, 2004).

- a) **Zonas Béticas Internas:** Están formadas por materiales fundamentalmente paleozoicos intensamente deformados, estructurados en mantos de cabalgamiento. Esta zona ha sido subdividida, de muro a techo, en los complejos Nevado-Filábride, Alpujárride (denominado Sébtide en el Rif marroquí) y Maláguide (denominado Ghomáride en el Rif). El frente de las Zonas Internas constituye las denominadas Unidades Frontales, tradicionalmente denominadas Dorsal, Predorsal o Complejo dorsalino (Durand-Delgá, 1980). En la orilla Sur del estrecho de Gibraltar están representadas (en Ceuta y sus alrededores) los complejos Alpujárride y Maláguide y la Dorsal Calcárea y los flyschs predorsales. Estos mantos presentan continuidad geográfica en las cadenas béticas y rifeñas lo que indica que las dos cordilleras constituyen un solo orógeno (SECEG, 2003). Las Zonas Internas afloran en la fachada mediterránea de la Cordillera Bética, del Rif y de las Kabilias argelinas. El Dominio de Alborán se dispone cabalgante sobre otros dominios que afloran de manera asimétrica en su periferia. Por un lado, los dominios Sudibérico (que incluye el Prebético y el Subbético) y Magrebí (Pre-Rif, Meso-Rif e Intra-Rif), que proceden de la reestructuración de los palomárgenes mesozoico-cenozoicos del Sur de Iberia y del Norte de África, respectivamente. Por otro, el Dominio del Surco de los Flyschs, alóctono sobre los anteriores, cuya cobertera está organizada en la actualidad como un cinturón deformado de pliegues y cabalgamientos (Luján *et al.*, 2003).
- b) **Zonas Béticas Externas:** Esta zona agrupa los sedimentos paleógenos y mesozoicos depositados en los paleomárgenes de las placas Ibérica (Dominio Sudibérico) y Africana (Dominio Magrebí). En este caso, existen importantes diferencias en cuanto a su sedimentación y evolución geológica de ambos paleomárgenes del Estrecho, que presentan características muy dispares especialmente a partir del Cretácico superior. Esto indicaría la existencia de un accidente tectónico importante entre ellos.
- c) **Complejo de los Flyschs:** Este complejo está representado en ambas orillas del Estrecho, habiéndose demostrado la homología de facies litológicas (SECEG, 2003). Las unidades que constituyen este complejo son, como su nombre indica, de naturaleza turbidítica,

derivadas de un surco profundo. Su depósito se produjo en un surco profundo de corteza adelgazada instalado en una zona transformante activa durante el Mesozoico y que forma actualmente un prisma de acreción inactivo (Luján *et al.*, 2006). Situado entre los dominios de Alborán y Magrebí, recibió aportes turbidíticos desde ambos lados desde el Cretácico inferior al Burdigaliense medio; se encuentra estructurado en mantos de cabalgamiento y diferenciadas diversas unidades litoestratigráficas. La zona de estudio se localiza en este complejo de los Flyschs, dentro del denominado Complejo del Campo de Gibraltar.

En la orilla norte del Estrecho, este Complejo está compuesto por dos unidades principales: la unidad del Aljibe y la de Algeciras (Crespo-Blanc *et al.*, 2007). Ambas unidades presentan un carácter turbidítico diferenciándose por el origen de los clastos. En el caso de la Unidad de Algeciras estos provienen de la erosión de las rocas metamórficas del Dominio de Alborán. En el caso de la Unidad del Aljibe provienen del cratón africano. Este complejo se sitúa, en la rama norte del arco de Gibraltar, estructuralmente sobre las unidades del Subbético y esporádicamente, sobre la unidad de Almarchal (formada por materiales Cretácicos del Dominio Magrebí).

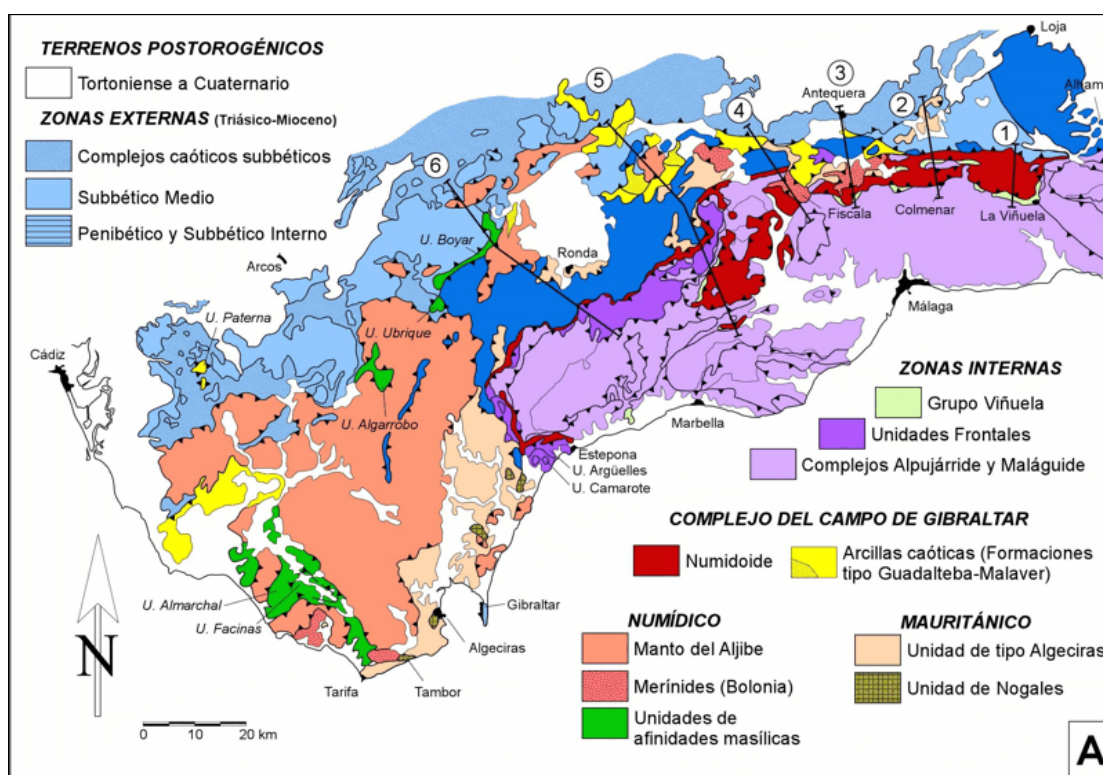


Figura 2-3. Esquema tectónico de la subdivisión y relaciones tectónicas del Complejo del Campo de Gibraltar en el sector occidental de la Cordillera Bética (Vera Torres, 2004).

La región del estrecho de Gibraltar presenta una geología compleja, fruto de la evolución de las cordilleras Bética y Rifeña, así como del conjunto del Mediterráneo occidental. Esta complejidad ha favorecido la aparición de numerosas y diferentes interpretaciones y, en algunos casos, enfrentadas; si bien, dado que quedan fuera del propósito de esta tesis, no se entrará en la discusión de las diferentes interpretaciones y se expondrán únicamente aquellas más admitidas.

La propia naturaleza del estrecho Estrecho de Gibraltar ha sido en muchas ocasiones discutida. Dado su carácter divisorio entre dos continentes y su situación próxima al contacto de dos placas litosféricas (placa Euroasiática y placa Africana), se le ha asociado al Estrecho la existencia de un accidente tectónico de primer orden. Sin embargo, la homología de las unidades litoestratigráficas y las estructuras entre las dos orillas del Estrecho observada en las

unidades del Complejo de los Flysch y de las Zonas Internas, parecen indicar que este no representa tal accidente tectónico importante, y pueda deberse más a la evolución geomorfológica de la zona.

La distribución geográfica actual de las cordilleras Bética y Rifeña conforma un arco (arco de Gibraltar) cuyo ápice se localiza en la zona del Estrecho (apuntando hacia el oeste). Esta disposición ha tenido a lo largo de las últimas décadas diferentes interpretaciones (Andrieux *et al.*, 1971; Durand-Delgá, 1973; Balanya y Garcia-Dueñas, 1987; SECEG, 1990). Actualmente se interpreta como el frente del cabalgamiento del bloque de corteza continental del Dominio de Alborán hacia el oeste.

## 2.4 Tectónica

Como se ha comentado anteriormente, las unidades turbidíticas del Complejo del Campo de Gibraltar se depositaron entre el Cretácico inferior y el Burdigaliense medio en una cuenca profunda, situada entre la microplaca de Alborán (Figura 2-4) y las zonas externas rifeñas, en el contacto entre las placas Euroasiática y Africana. Posteriormente, durante el Mioceno inferior-medio la placa de Alborán sufrió una traslación hacia el oeste (Andrieux y Mattauer, 1973) empujando las series de flyschs y produciendo su traslación y apilamiento plurikilométrico en mantos de cabalgamiento con vergencia al Oeste, estructurados en escamas tectónicas.

Tras esta primera fase de plegamiento se produce una segunda fase, probablemente durante el Langhiense inferior, de tectónica polifásica con episodios de contracción y extensión que modifica profundamente la complicada estructura del Complejo de los Flyschs, generando grandes fallas de desgarre y pliegues hasta dejar irreconocible el edificio de mantos.

Movimientos tectónicos posteriores, durante el Plioceno-Holoceno, han creado en esta zona pliegues de gran radio y reactivado alguna falla anterior.

La naturaleza arcillosa que, en su mayoría, presentan estas unidades hace que los afloramientos existentes no sean de gran calidad. Esto, unido a la falta de estructuras geológicas penetrativas, dificulta el estudio e interpretación de esta tectónica polifásica. A estas dificultades se les une la falta de depósitos sedimentarios que fosilicen las diferentes fases tectónicas.

La importante deformación tectónica que se observa en la zona de estudio hace que la realización de cortes geológicos de detalle sea extremadamente compleja, sobre todo en la parte submarina del Estrecho donde los datos conocidos resultan insuficientes.



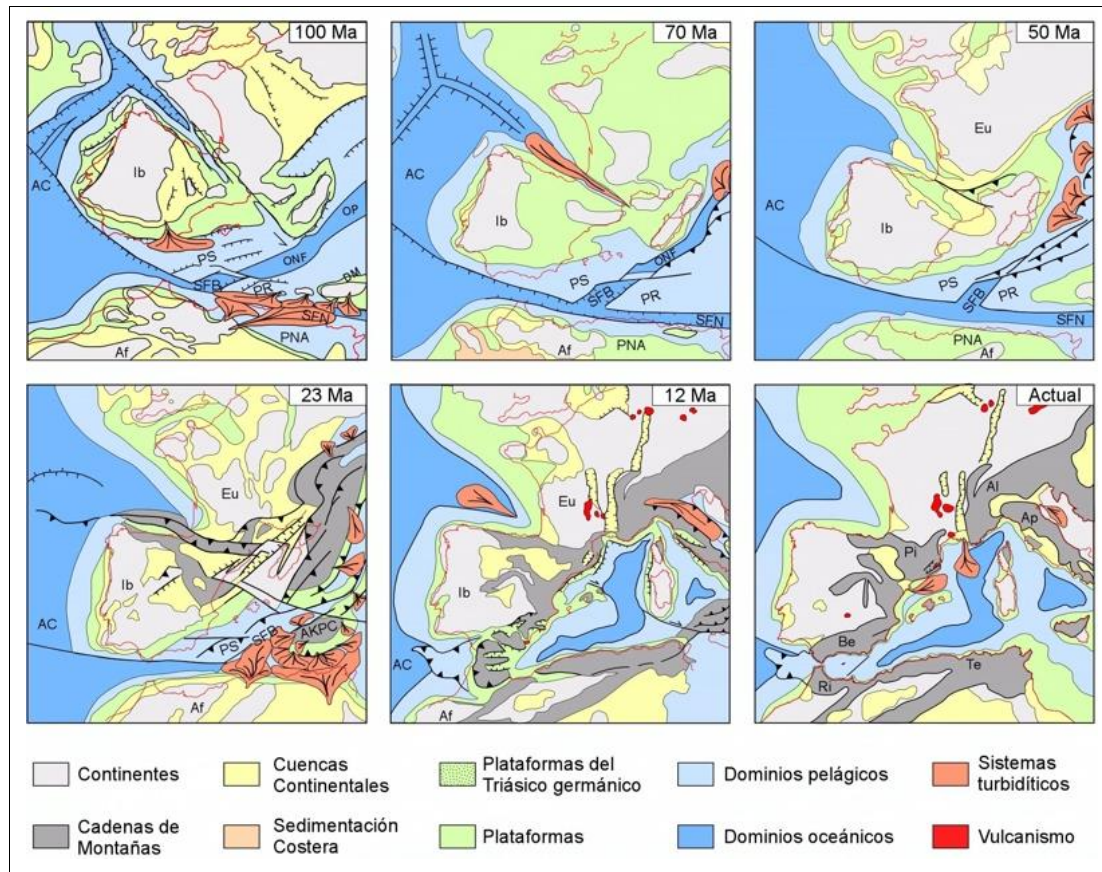


Figura 2-4. Evolución paleogeográfica de la Cordillera Bética y dominios adyacentes desde el Cretácico hasta la actualidad (Vera Torres, 2004)

## 2.5 Estratigrafía de las distintas unidades

En este apartado se realiza una descripción litoestratigráfica general de las principales unidades turbidíticas del Complejo de los Flyschs, tal como aparecen en la zona de estudio, sin considerar otras facies más locales que se presentan en algunos puntos en ambas orillas (Figura 2-5).

Las principales unidades, que se describirán a continuación, son: Unidad de Algeciras (*Beni-Ider*), Unidad de Los Nogales (Yebel Tisirène), Unidad de Bolonia (*Tala Lacra*), Unidad del Aljibe (Numídico), Unidad de Facinas (*Melloussa*), Unidad de Almarchal (*Tanger*) y los rellenos pliocuaternarios de los paleocanales del estrecho de Gibraltar.

### 2.5.1 Unidad de Algeciras (*Beni-Ider*)

Fue definida por Didon (1960). Es homóloga a la unidad marroquí de *Beni-Ider*. Esta unidad se depositó entre el Cretácico superior y el Mioceno. Se caracteriza por presentar en el tramo superior de su serie una sucesión turbidítica, de gran espesor, de areniscas micáceas, denominado “Flysch de Algeciras”.

De techo a muro, los términos más importantes de su sucesión tipo que afloran en esta área de estudio, son los siguientes (Figura 2-5):

- a) Flysch margo-areniscoso-micáceo. Sucesión constituida por una alternancia de argilitas pelíticas margosas con bancos de areniscas de composición cuarzo-calcárea. Estos bancos de arenisca son de espesor variable, llegando a ser métricos. La potencia de esta unidad es de unos 1200 m (Pendon, 1978) en la zona de Punta Carnero. Se ha estimado una edad para esta sucesión entre el Oligoceno superior y el límite Oligoceno-Mioceno que para Didon (1973) alcanzaría hasta el Aquitaniense.
- b) Pelitas rojas con delgadas intercalaciones de niveles de limolitas calcáreas/ calcarenitas. Se han datado como Eoceno superior a Oligoceno. En la zona de estudio su potencia varía entre los 50 y los 100 m. Tanto el contacto superior con el flysch margo-areniscoso-micáceo como el inferior con el flysch calcáreo eoceno son en tránsito gradual.
- c) Flysch calcáreo compuesto por bancos decimétricos alternantes de calcarenitas y pelitas arcillosas rojizas y verdosas. Según las dataciones, se trata de materiales del Eoceno medio y superior y su potencia ronda los 100 m.
- d) Arcillas y pelitas esquistosas rojas y verdes alternantes con capas de calcarenitas de espesor métrico. Los bancos calcareníticos presentan granoselección y abundantes estructuras sedimentarias y laminaciones paralelas, convolutadas. Se ha datado como Cretácico superior a Paleoceno y su potencia es superior a los 100 m.

La sucesión del Cretácico superior presenta diferencias entre la orilla española (Unidad de Algeciras) y la orilla marroquí del Estrecho (Unidad de *Beni-Ider*). En esta última las arcillas y calcarenitas se sustituyen por un flysch calcáreo con sílex, de comportamiento geotécnico similar al Eoceno de la unidad de Algeciras.

### **2.5.2 Unidad de Los Nogales (Yebel Tisirène)**

La unidad de Los Nogales (Didon, 1969) tiene en la unidad del *Yebel Tisirène* su equivalente en la orilla marroquí del Estrecho. Al considerarse una diverticulación de la unidad de Algeciras, estratigráficamente se correspondería con la parte basal (Cretácico inferior) de la misma.

En esta unidad se distinguen dos conjuntos (Figura 2-5):

- a) Flysch (Neocomiense superior-Albiense) formado por alternancia de areniscas cuarzosas de grano fino y color verde, con pequeños niveles de argilita gris. Las areniscas se disponen en bancos métricos en cuyas bases son abundantes las estructuras sedimentarias de corriente. Este flysch presenta un espesor de unos 150 m en la orilla española, mientras que en la orilla sur del Estrecho está muy desarrollado alcanzando espesores de hasta 1 km.
- b) Unidad basal de edad Neocomiense formada por pelitas calcáreas marrones con niveles detríticos, areniscas laminadas y calizas micríticas.

### **2.5.3 Unidad de Bolonia (Tala Lakrah)**

La unidad de Bolonia, definida por Didon (1969) tiene en la unidad de *Tala Lakrah* su equivalente marroquí. Constituye una serie intermedia entre las de Algeciras y del Aljibe, sirviendo a Didon y Hoyez (1978) para definir la “Zona Merínide” en el Yebel Iman Rhit (Marruecos), como de transición paleogeográfica y tectónica entre las series mauritanas de *Beni-Ider* (Algeciras) y el Numídico (Aljibe) (SECEG, 2003). Su edad va desde el Cretácico superior al Aquitaniense.

De techo a muro pueden definirse los siguientes niveles (Figura 2-5):

- a) Flysch margo-areniscoso-micáceo. Este nivel es similar al de la unidad de Algeciras aunque presenta varios niveles intercalados de entre 2 y 8 m de espesor (mayores en la unidad de *Tala Lakrah*) de espesor, de areniscas de facies “numídicas”. Hacia la base (los 50 m inferiores de este nivel) presenta una composición mayoritariamente margosa. Se le ha datado una edad Oligo-Aquitaniense. El espesor máximo medido en este flysch ha sido de unos 200 m, si bien se estima que este podría ser mucho mayor.
- b) Pelítas rojas arenosas de facies iguales a las de la unidad de Algeciras. Al igual que en ésta, las pelitas se han datado como Eoceno superior a Oligoceno y su potencia ronda los 100 m.
- c) Alternancia de bancos decimétricos de calcarenitas y niveles margosos blanquecinos de escaso espesor. Se ha datado como edad eocena. La potencia de la unidad es de unos 30 o 40 m. Estas calcarenitas son semejantes a las existentes en la unidad del Aljibe, si bien, no presentan nódulos de sílex.
- d) Bancos métricos de calcarenitas (con *Microcodium*) intercalados con niveles de arcillas de colores rojizos y verdes. Este tramo, de unos 30 m de espesor ha sido datado como Paleoceno.
- e) Calcarenitas con clastos silíceos dispuestas en capas con espesores medios de 1 m con intercalaciones margosas verdes y rojizas más abundantes hacia la base. Los espesores máximos medidos para este tramo llegan a los 30 m. Se ha datado como Cretácico superior.
- f) El tramo basal de la unidad está compuesto por niveles de arcillas versicolores en la que aparecen intercalados delgados niveles competentes de caliza micrítica algo arcillosa que presenta a muro un nivel turbidítico (arenisca calcárea). La edad de este tramo es Cretácico superior. La potencia se estima por encima de los 40 m aunque se desconoce con seguridad. En mal afloramiento, los bloques micríticos pueden confundirse con las calizas de facies “arlequín” del Senoniense de la Unidad de Almarjal.

### **2.5.4 Unidad del Aljibe (Numídico)**

Su término más característico son las potentes areniscas cartografiadas y descritas por Gavala (1924) como las “Areniscas del Aljibe”. Es la unidad equivalente al Numídico localizado en el norte del Magreb o Sicilia. Su edad va desde el Cretácico superior al Burdigaliense.

La columna tipo en la zona de estudio es la siguiente, de techo a muro (Figura 2-5):

- a) Arcillas y margas marrones con intercalaciones de arenisca micácea y sílexita. Este nivel, que alcanza los 100 m, inicialmente fue reconocido únicamente en el Complejo del Campo de Gibraltar (Didon *et al.*, 1984), pero revisiones cartográficas posteriores (realizadas por SECEG y SNED) han localizado algunos afloramientos en ambas orillas del estrecho. Este término representa el final de la sedimentación del surco de los flyschs y su edad es Burdigaliense.
- b) “Areniscas del Aljibe”: Serie tipo flysch con alternancia de arcillas y potentes bancos (métricos a decamétricos) de areniscas cuarzosas, de grano medio-grueso y cemento silíceo (ausencia total de carbonatos). La relación entre materiales pelíticos y areniscosos es variable en torno al 50 %, si bien en afloramiento dominan claramente las areniscas. Su potencia llega a alcanzar los 2000 m (SECEG, 2003). La edad de esta serie es Aquitaniense.
- c) Pelitas arenosas rojizas semejantes a las localizadas en las unidades de Bolonia y Algeciras. En algunos puntos se han descrito pequeños bancos de areniscas calcáreas-calcareniticas. Su edad es Eoceno superior-Oligoceno superior.
- d) Calcareniticas con nódulos de sílex dispuestas en bancos de entre 10 y 50 cm con intercalaciones de niveles menos potentes de margas blanquecinas. Su edad es Eoceno medio-inferior.
- e) Niveles arcillosos rojizos y verdosos con bancos métricos intercalados de calcarenitas convolutadas, en ocasiones arenosas, con niveles de microbrechas y nódulos piríticos en sus bases. Este término data del Paleoceno al Cretácico superior. Las litofacies son iguales a las que presentan las unidades de Bolonia y Algeciras en la misma edad.

Los niveles areniscosos de la Unidad del Aljibe, competentes y poco erosionables sobre todo en comparación con las unidades circundantes, forman la gran mayoría de elevaciones existentes en la provincia de Cádiz. Los términos basales, predominantemente arcillosos, afloran a pie de las sierras y en conjunto tienen un espesor entre 400 y 500 m.

### **2.5.5 Unidad de Facinas (Melloussa)**

La unidad fue definida por Didon (1967) en los alrededores del pueblo de Facinas (Tarifa, Cádiz). Tiene equivalencia con la unidad massiliense de *Melloussa* en Marruecos. Se ha datado como Albiense-Aptiense al Cenomaniense-Paleoceno. Las malas condiciones de sus afloramientos impiden la determinación precisa de su potencia, si bien se estima en unos 800 m (SECEG, 1996).

De manera simplificada puede decirse que esta unidad está formada por arcillas violáceas y verdes, en las que se intercalan delgados niveles de cuarzoareniscas de grano muy fino y cemento ferruginoso y algunos lechos ferro-manganesíferos muy compactos y discontinuos (discos). Si bien no hay consenso sobre la afinidad de esta unidad, parece que pudiera constituir una formación de la unidad del Aljibe o incluso de la de Bolonia (SECEG, 1996).

Dentro de esta unidad se han descrito dos conjuntos, de muro a techo (Figura 2-5):

- a) Arcillas versicolores con intercalación de capas centimétricas de cuarzoareniscas de grano fino. Aparecen también niveles de arcillas con cemento ferro-magnésico discontinuos que

forman estructuras discoidales de hasta 50 cm de diámetro máximo. Este nivel, datado como Albiense-Aptiense es homólogo al “flysch albo-aptiense” de *Melloussa*.

- b) Gradualmente las arcillas aparecen menos compactas y desaparecen los niveles de arenisca. Se reconocen, al igual que en el tramo anterior, los niveles cementados y las estructuras discoidales. En este tramo existe un nivel constituido por arcillas grises azuladas, expansivas, con concreciones de Fe y Mn semejantes a las “*bousses*” que aparecen en el Senoniense de la unidad de *Tanger* occidental.

En España, junto al Embalse de Almodóvar, dentro de estas arcillas versicolores se ha reconocido un nivel guía de fñanitas síliceas negras, datadas como Cenomaniense (SECEG, 1996).

Finalmente, dentro de este mismo tipo de arcillas y en aparente continuidad estratigráfica, aparecen intercalaciones esporádicas, inferiores a 1 m de espesor, de calcarenitas convolutadas, que determinan una edad Senoniense-Paleoceno.

### **2.5.6 Unidad de Almarchal (*Tanger*)**

Esta unidad, definida por Didon (1967), tiene en la unidad de *Tanger* su equivalente en la orilla sur del Estrecho. Representa las zonas externas magrebíes (las sudibéricas no afloran en el área) y es el para-autóctono relativo para el resto de las unidades de flyschs del Complejo del Campo de Gibraltar, que se instalaron durante su desplazamiento en sucesivos mantos de cabalgamiento. Las dataciones indican que el depósito de esta unidad se realiza en el límite Campaniense-Maastrichtiense (SECEG, 2003).

La unidad de Almarchal está formada, principalmente, por arcillas y margas esquistasas grisáceas con intercalación de pequeños niveles turbídíticos (calcarenitas). También se intercalan algunos bancos de calcarenitas convolutadas que llegan a alcanzar los 2 o 3 m de espesor. En ocasiones aparecen niveles de sílex de más de un metro de espesor formados por silicificación de los materiales calcareníticos. Son frecuentes y características las intercalaciones de bancos decimétricos de calizas arcillosas finas, micríticas, con aspecto sublitográfico (calizas de facies “arlequín”) (SECEG, 2003). La fracción fina está compuesta por los siguientes minerales: caolinita (23 %), illita (25 %), esmectita (8 %), interestratificados de illita-esmectita (30 %) y clorita autigénica (13 %). Estas arcillas son propensas a importantes problemas de hinchamiento, si bien presenta alta impermeabilidad (SECEG, 1996).

En la orilla marroquí del Estrecho esta unidad se subdivide en: *Tanger* oriental, con facies semejantes a las de la orilla española; y *Tanger* occidental que presenta dos litofacies diferenciadas conocidas como “*Tanger con bousses*”, de composición mayoritaria arcillosa, con concreciones de Fe y Mn; y “*Tanger con bolos*” con mayor proporción de margas y presencia de concreciones calizas en forma de “bolos” amarillentos.

La potencia de la unidad es desconocida debido a que se encuentra fuertemente plegada y tectonizada, si bien se estima que debe sobrepasar los 600 m (Esteras Martín *et al.*, 2004). La alteración de la Unidad en superficie es notable, siendo muy escasos los afloramientos rocosos de calidad correspondientes a los niveles más competentes.

La ausencia de buenos afloramientos hace que sean desconocidos sus términos basales ni su cobertera estratigráfica (SECEG, 1996).

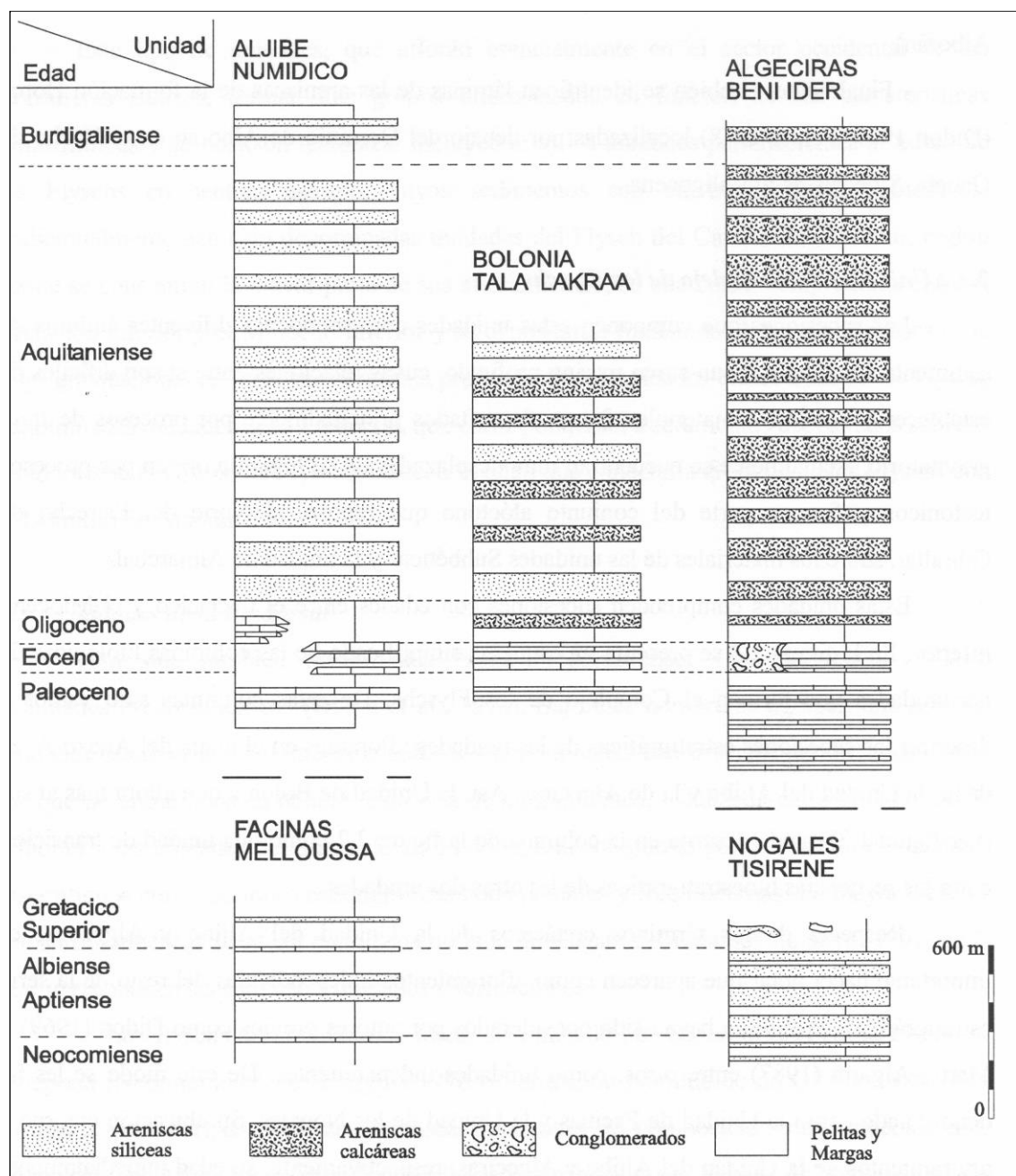


Figura 2-9. Columnas estratigráficas simplificadas de las Unidades del Complejo de los Flyschs. Tomadas de Luján (2003), a su vez basadas en SECEG (1981).

### 2.5.7 Rellenos de paleocanal

La configuración batimétrica del estrecho de Gibraltar condiciona muy estrictamente la zona de trazado submarino de una obra de enlace fijo entre las dos orillas, cualquiera que sea el tipo de solución que se adoptase, ya sea túnel o puente. La zona más angosta del Estrecho tiene unas profundidades del orden de 1000 m, lo que obliga a desplazar el trazado a la zona occidental donde la existencia del Umbral del Estrecho (de Punta Paloma a Punta Malabata) hace que se presenten las condiciones batimétricas más favorables, al no sobrepasar los 300 m.

Los fondos marinos del Estrecho presentan formaciones post-orogénicas recientes recubriendo el sustrato de “flyschs”. A partir de la isobata -150 m se desarrollan formaciones coralinas que



generan una costra calcárea (caliza coralina), ocasionalmente potente, que recubre las zonas profundas del Umbral, sin alcanzar las cotas que pudieran afectar al trazado del túnel.

En la zona central y más profunda del Umbral (Figura 2-6), las campañas de perforación de sondeos profundos (entre 1997 y 2005) pusieron de manifiesto la existencia de dos paleocanales profundos y transversales al trazado (Figura 2-7), rellenos de materiales cuaternarios (caliza coralina, conglomerados, arenas biolitolásticas y brechas arcillosas), cuya profundidad máxima, actualmente no conocida, sobrepasa los 625 m bajo el nivel del mar. Las brechas tienen la misma naturaleza que los “flyschs”, ya que están constituidas por sus materiales arcillosos englobando cantos competentes de flyschs (calcarenitas, areniscas, limolitas calcáreas,...) pero presentando un aspecto caótico y desordenado, y con incertidumbres sobre su estado de consolidación. Se interpretan como materiales desprendidos de los abruptos taludes de los paleocanales, una vez estabilizadas las aguas entre el océano Atlántico y el Mar Mediterráneo.

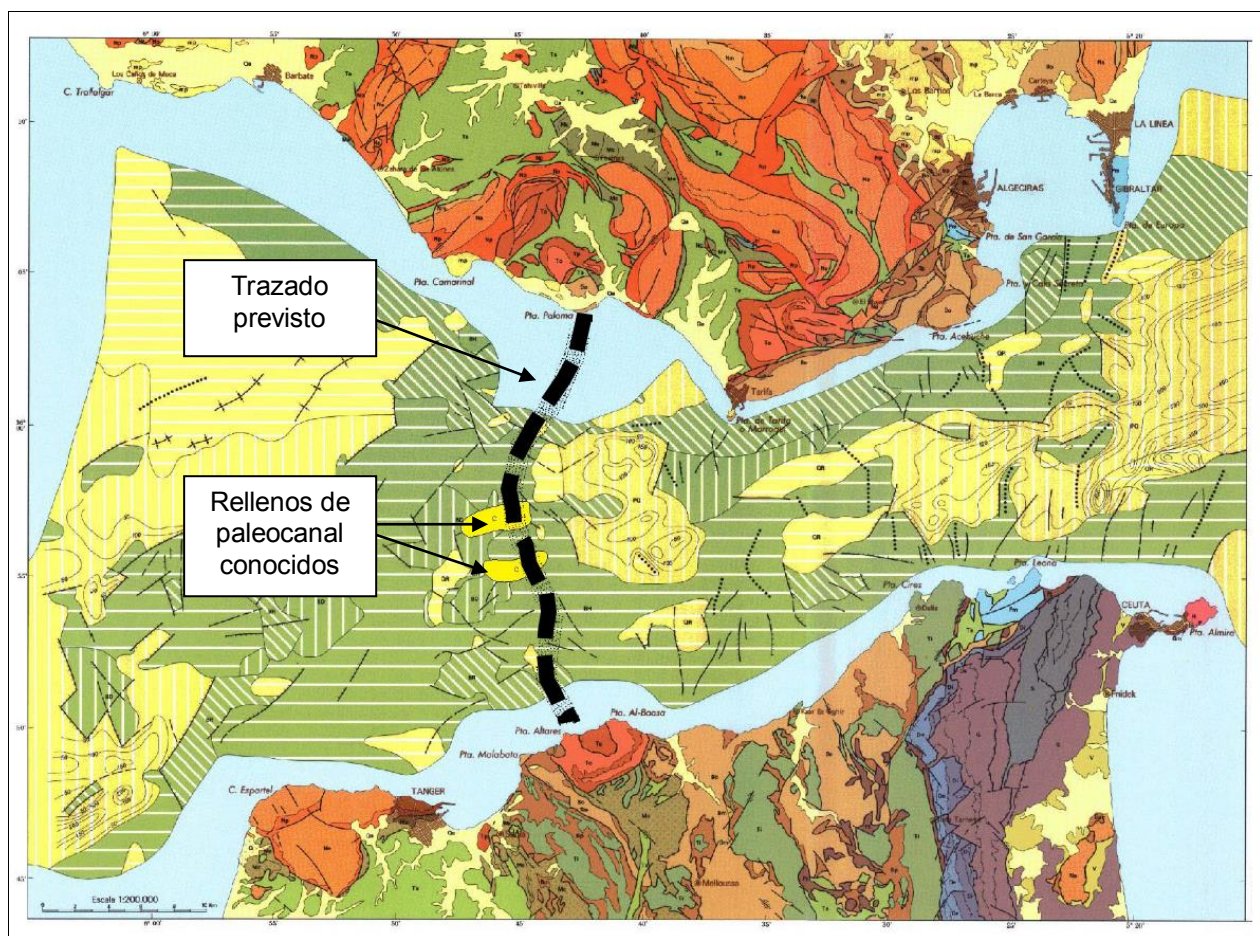


Figura 2-6. Mapa geológico del Estrecho de Gibraltar en el que se muestra la situación de los rellenos de paleocanal en el entorno del Umbral del Estrecho (SECEG *et al.*, 1990).

La formación de los paleocanales puede ser explicada por el siguiente proceso geológico: 1) Erosión de dos estrechos y profundos canales, de dirección Este-Oeste, en los “flyschs” durante la inundación del Atlántico hacia el Mediterráneo durante el Plioceno, hace unos 5 millones de años; 2) Relleno de los canales por brechas arcillosas generadas por colapsos submarinos; 3) Erosión de las brechas en el canal meridional, abriéndose un nuevo canal; 4) Relleno de este nuevo canal erosivo por arenas biolitoclásticas (ningún sondeo realizado en el canal Septentrional cortó estas arenas); 5) Depósito de conglomerados con cantos de “flyschs” muy rodados y rodolitos, que fosilizan las arenas y las brechas, y 6) Desde la glaciación del Würm

hasta la actualidad, la zona profunda del Estrecho se colonizó por corales hermatípicos que generan una costra caliza coralina muy dura, que recubre todo, protegiendo el Umbral de nuevos procesos erosivos.

Los principales materiales que conforman el relleno de los paleocanales (Figura 2-7) son, de techo a muro (Esteras *et al.*, 2000):

#### 2.5.7.1 Calizas litohérmicas

Estas calizas coralinas recubren, de forma casi generalizada, el fondo del Estrecho a partir de la isobata 220 m. Forman litohermos alargados según la dirección de la corriente dominante (E-O).

El esqueleto de las calizas está constituido por restos de una fauna afótica de aguas frías, fundamentalmente corales ramificados y solitarios. Son también muy frecuentes los balanos y briozoos.

La abundante matriz presenta una fracción arenosa formada por bioclastos y en menor medida por litoclastos (cuarzo y cantos de flysch) y rellena prácticamente todos los huecos entre bioclastos. Este depósito presenta también un cemento calcáreo.

#### 2.5.7.2 Conglomerados basales

Solamente se han localizado en la zona de La Meseta con espesores de hasta 22 m. Presenta un contacto neto con las calizas suprayacentes y gradual con las arenas infrayacentes.

Estos conglomerados litobioclásticos son altamente heterométricos y matriz-soportados con cemento calcáreo. Están formados por clastos líticos redondeados de hasta 5 cm provenientes de las unidades flyschoides circundantes (principalmente areniscas) y bioclastos (principalmente piezas de balanos y fragmentos de gasterópodos, bivalvos, corales solitarios y gran abundancia de rodolitos).

#### 2.5.7.3 Arenas litobioclásticas

Están compuestas por arenas gruesas y gravas de composición cuarzosa y bioclástica similar a la de los conglomerados.

Los granos de cuarzo, homométricos, van de 1 a 1,5 mm de diámetro y presentan una morfología redondeada. Parecen proceder de la erosión de las areniscas del flysch de Algeciras. Los componentes arcillosos y bioclásticos muestran una importante alteración dando materiales finos que crean un efecto matriz que da cierta cohesión al depósito.

#### 2.5.7.4 Brechas arcillosas

Estos materiales se han descrito como una brecha polimíctica de coloraciones gris-verdosas y marrón-rojizas en la que los clastos son fundamentalmente argilíticos y todos pertenecientes a distintos tramos de las unidades de flyschs conocidas en el Estrecho, especialmente de sus sucesiones basales (Esteras *et al.*, 2000).

Los clastos son altamente heterométricos, yendo desde cantos milimétricos a bloques de más de 1 m. El tamaño medio es de orden centimétrico.



De manera general, la estructura es caótica, sin ningún tipo de estratificación reconocible. Se ha descrito algún nivel con imbricación de cantos a 45° o superior.

En alguno de los testigos extraídos se han observado superficies de deslizamiento estriadas en el contacto de los grandes bloques con la brecha de granulometría más fina que se han interpretado como estructuras propias de un depósito de avalancha o como fenómenos de compactación diferencial.

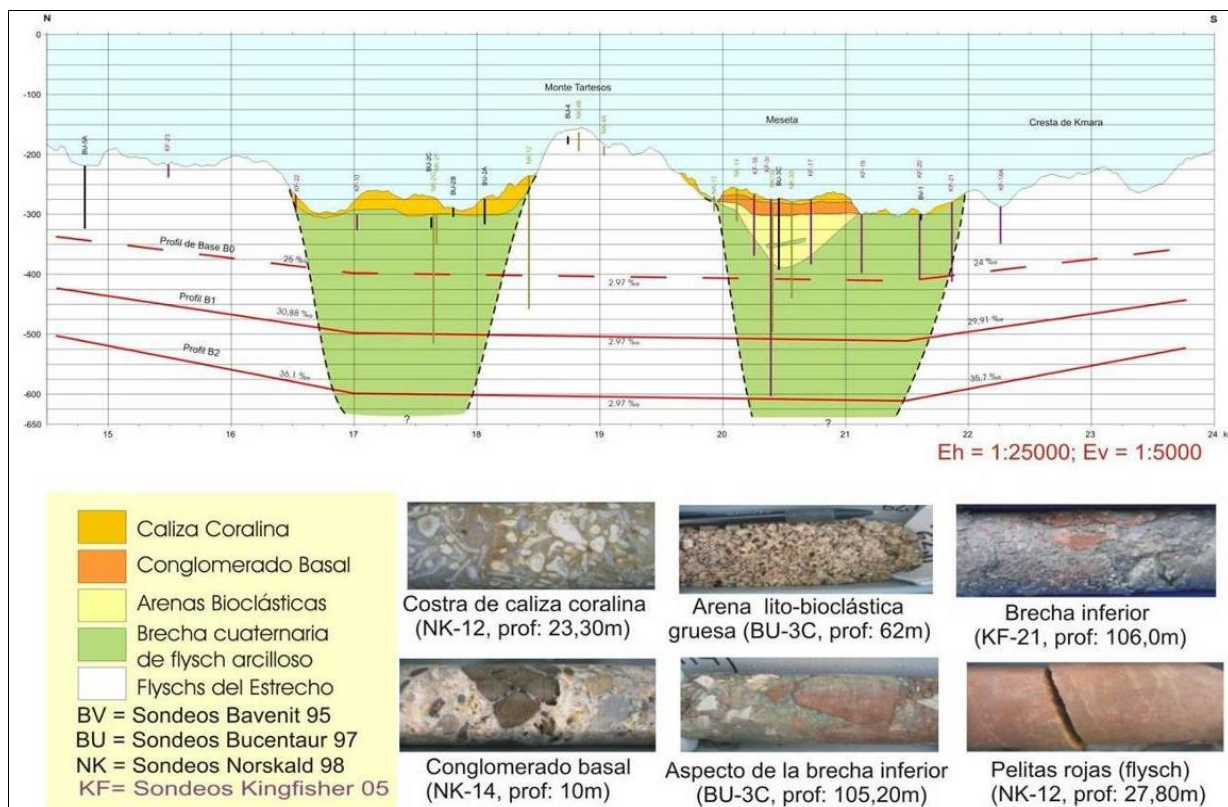


Figura 2-7. Paleocanales en el área central del Umbral de Camarinal descubiertos e investigados por SECEG durante la ejecución de las campañas de sondeos marinos profundos y litologías atravesadas por dichas perforaciones (Sandoval *et al.*, 2011).

## 2.6 Afección de cada unidad al proyecto de túnel

Según los reconocimientos realizados en el fondo del Estrecho SECEG ha estimado, para la traza prevista para el futuro túnel (solución Umbral de Camarinal), el porcentaje de la misma que está excavada en cada una de las unidades (

Tabla 2-1).

Tabla 2-1. Porcentaje de la traza del futuro túnel excavada en cada una de las unidades

Unidades	Litología	Longitud (m)	Porcentaje (%)	
Unidad de Aljibe (Numídico)	Areniscas cuarcíticas numidienses	0	0	0
	Serie basal (argilitas con intercalaciones de calizas)	0	0	
Unidad de Algeciras ( <i>Beni Ider</i> ) o Unidad de Bolonia ( <i>Tala Lakra</i> )	Flysch margo-areniscoso-micáceo más competente	6200	17	73
	Flysch margo-areniscoso-micáceo menos competente	3100	8	
	Serie basal (argilitas con intercalaciones de limolitas y calizas)	9700	25	
	Serie basal (argilitas con muy escasas intercalaciones)	9050	23	
Unidad de Almarchal ( <i>Tanger</i> )	Argilitas con bancos intercalados de calcarenitas	1000	3	14
	Argilitas con algún banco (escaso) intercalado de calcarenitas	4450	11	
Unidad de Facinas ( <i>Melloussa</i> )	Argilitas con finos bancos de areniscas cuarcíticas ferruginosas	2000	5	5,5
	Argilitas con delgados niveles ferruginosos	250	0,5	
Unidad de Los Nogales ( <i>Tisirène</i> )	Areniscas cuarcíticas y argilitas intercaladas	500	1	1
Rellenos de Paleocanal	Brechas arcillosas	2400	6	6
	Arenas bioclásticas	0	0	
<b>TOTAL</b>		38650	100	100

En esta tabla puede verse que, según el proyecto actual, el túnel atravesará, en la mayor parte del trazado (73 %), las unidades de Algeciras y Bolonia (no diferenciadas en esta tabla dadas sus características, a priori, semejantes) seguidas por las unidades de Almarchal (14 %), las brechas (6 %), la Unidad de Facinas (5,5 %) y la de Los Nogales (1 %). La unidad del Aljibe y las arenas bioclásticas no serán atravesadas por el túnel.



## **CAPÍTULO 3**

# **RECOPIACIÓN DE DATOS GEOTÉCNICOS PREVIOS**



# 3.

## RECOPIACIÓN DE DATOS GEOTÉCNICOS PREVIOS

---

Este capítulo se centra en la recopilación y análisis de los datos de carácter geológico-geotécnico, generados hasta la fecha, durante los más de treinta años que lleva en marcha el proyecto de enlace fijo entre Europa y África a través del estrecho de Gibraltar. Esta recopilación conlleva una homogenización de los datos, desde el punto de vista de unidades y criterios, que permitirá una simplificación muy importante en el uso y aprovechamiento de los mismos.

Dentro de los documentos estudiados existen varios trabajos de recopilación que pretenden, de manera similar a este documento, recoger la ingente cantidad de datos obtenidos a lo largo del tiempo (Perez Moreno, 1991; García González, 1996; INGEMA, 1997; Martín Ruíz, 1997; SECEG, 2001). Todas estas recopilaciones presentan algún inconveniente, o bien son parciales, centrándose únicamente en un material, zona o aspecto concreto, o se han quedado obsoletas y no recogen los datos más recientes. Además de estos documentos técnicos, son varios los trabajos de investigación y tesis que se han desarrollado con datos procedentes de este proyecto (Abdellah y Mohammed, 1986; Vogel, 1996; Martín Ruíz, 1998) así como artículos de carácter científico (Esteras y Bahmad, 1989; Pliego, 2005b; Lombardi *et al.*, 2009; Dong *et al.*, 2013; Muñiz Menéndez *et al.*, 2013; Perucho *et al.*, 2014).

En total se ha revisado y analizado más de 600 documentos de índole geológico-geotécnica, redactados desde los años 80 por los diferentes grupos de trabajo involucrados en el desarrollo del proyecto. Estos documentos analizan tanto en el fondo del estrecho como en las dos orillas, permitiendo el estudio de toda la traza del túnel. La mayor parte de los documentos consultados forman parte de la base de datos que las sociedades SEGEG y SNED han creado y mantenido a lo largo del tiempo.

Los datos relevantes son recogidos y organizados a fin de simplificar al máximo su estudio. La unión de todos ellos en un solo documento supondrá una puesta en valor de los mismos, permitiendo una parametrización de los diferentes materiales y un análisis de las carencias existentes desde el punto de vista de su caracterización. Estos trabajos se desarrollarán en el capítulo 5 de esta tesis.

Se ha recopilado información de varias obras singulares: Pozo de Bolonia, Galería de Tarifa y Pozos y galerías de Malabata. Aunque de menor importancia también son de destacar las

zanjas de investigación excavadas a fin de estudiar los diferentes materiales *in situ*. También se han estudiado siete campañas de sondeos (entre sondeos marinos y terrestres) con más de 7000 m de perforación. La situación de estos reconocimientos se recoge en la Figura 3-1.

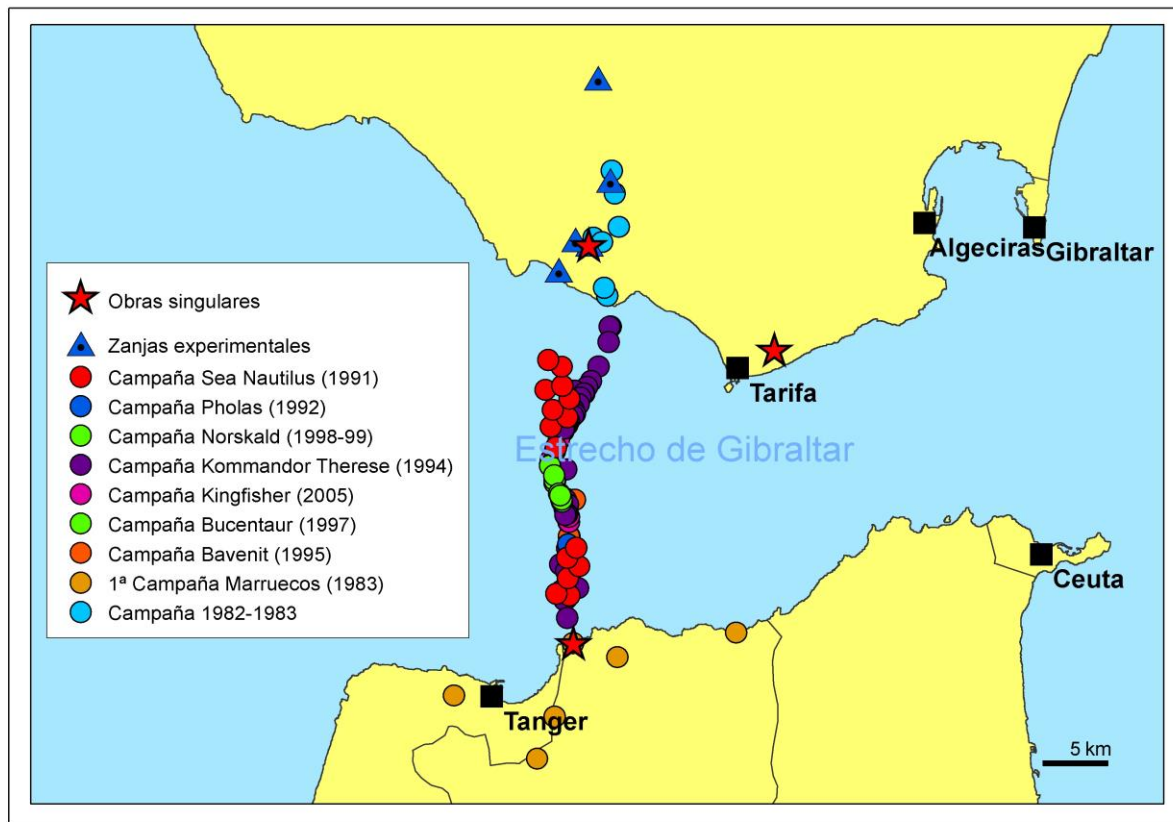


Figura 3-1. Situación de los principales reconocimientos

Las excavaciones experimentales y los sondeos se utilizaron para la ejecución de numerosos ensayos *in situ*. En total, en este estudio se han recopilado:

- 62 Ensayos presiométricos
- 15 Ensayos de gato plano
- 32 Ensayos de placa de carga
- 5 Ensayos de corte directo *in situ*
- 81 Determinaciones de la densidad *in situ* por el método de la arena
- 14 Ensayos de carga con *gripper*
- 37 Ensayos de permeabilidad Lefranc
- 49 Ensayos de permeabilidad Lugeon

Las muestras tomadas en las diferentes actuaciones, tanto obras singulares como campañas de sondeos, fueron utilizadas para la realización de un elevado número de ensayos de laboratorio. De manera general, el número de ensayos de laboratorio recopilados ha sido:

- 776 Medidas de humedad
- 683 Medidas del peso específico o la densidad
- 418 Determinaciones de los límites de plasticidad de Atterberg
- 297 Granulometrías
- 84 Análisis del hinchamiento de suelos
- 213 Determinaciones del contenido en carbonatos, sulfatos o materia orgánica

- 219 Ensayos de resistencia a compresión uniaxial
- 532 Ensayos de resistencia a carga puntual (PLT)
- 71 Ensayos de resistencia a tracción indirecta (ensayo brasileño)
- 67 Ensayos de resistencia a compresión triaxial
- 70 Ensayos de resistencia al corte directo
- 11 Ensayos edométricos
- 8 Ensayos de resistencia al corte directo en juntas
- 55 Medidas de la velocidad de propagación de ondas sísmicas en probetas
- 32 Ensayos SEHUDES

### 3.1 Excavaciones experimentales

Dentro de los trabajos de investigación y caracterización de las formaciones geológicas involucradas en el proyecto de túnel se han desarrollado varios trabajos de especial relevancia. En estos trabajos se ha buscado estudiar, a escala real, el comportamiento de los materiales mediante excavaciones de gran tamaño, debidamente instrumentadas y que han servido además, para probar diferentes técnicas de excavación y sostenimiento.

Hasta ahora se han realizado tres de estas obras singulares (Figura 3-2): dos en la orilla española, denominadas Pozo de Bolonia y Galería de Tarifa; y una en la orilla marroquí con la denominación de Pozos y galerías de Malabata.



Figura 3-2. Situación de las obras singulares

Además de estos tres trabajos, otros de similar magnitud fueron proyectados aunque por diferentes motivos no llegaron a realizarse. Uno de esos proyectos no realizados fue el denominado Pozo de Huerto de la Tabla.

Otros trabajos singulares, aunque de menor entidad, fueron las zanjas de experimentación excavadas entre 1984 y 1986.



### 3.1.1 Zanjas de experimentación

Entre diciembre de 1984 y noviembre de 1986 el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX realizó una serie de investigaciones *in situ* (CEDEX, 1985a, 1985b, 1987a) en el interior de seis zanjas excavadas a tal efecto (Figura 3-3). La excavación de las zanjas tenía como propósito permitir la realización de los ensayos en roca sana.

De las seis zanjas, la Zanja II tuvo que ser descartada para la realización de ensayos debido a condicionantes meteorológicos.

Los trabajos realizados en esta campaña fueron ensayos de carga con placa, ensayos de corte directo *in situ*, medida de la densidad *in situ* por el método de la arena y toma de muestras inalteradas de gran tamaño (véanse apartados 3.3.4.4, 3.3.4.6 y 3.3.1.4).



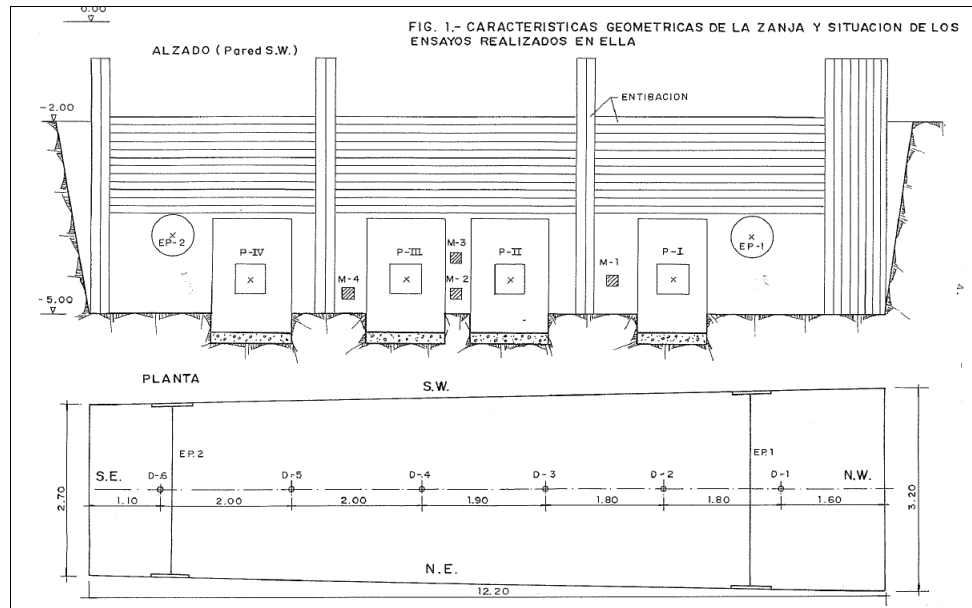
Figura 3-3. Situación de las zanjas experimentales

#### 3.1.1.1 *Zanja I (Z-I)*

El emplazamiento elegido para la realización de esta zanja se situó en las inmediaciones del cruce de Facinas (UTM: 255.600; 4.003.650) sobre materiales de las unidades de Almarchal y Facinas.

El eje de la zanja se orientó según dirección N145°E. Como puede observarse en la Figura 3-4, la excavación tenía una longitud de 12,2 m con una profundidad de 5 m. El ancho varía entre 2,7 y 3,2 m.

En el interior de la zanja se realizaron dos ensayos de carga con placa horizontal, cuatro ensayos de corte directo y seis medidas de densidad por el método de la arena. También se tomaron cuatro muestras inalteradas en bloque.



*P: ensayo de corte directo in situ; EP: ensayo de carga con placa; M: muestra inalterada; D: medida de la densidad*

Figura 3-4. Esquema y situación de los ensayos en la zanja Z-I (CEDEX, 1985a)

En la excavación se observaron argilitas, grises y azuladas, poco foliadas de la Unidad Almarchal. Intercaladas entre las argilitas aparecen escasas capas de 1 a 10 cm de espesor de areniscas de grano fino algo calcáreas. La estratificación, difícilmente reconocible, buza según 050/55 (sentido de buzamiento/ buzamiento). Esporádicamente aparecen algunos cristales de yeso dispersos de pequeño tamaño.

Asociadas a superficies de discontinuidad se aprecian zonas alteradas, llegando a suponer cerca del 50 % de la excavación. Las discontinuidades presentaban una forma irregular y superficies lisas y brillantes.

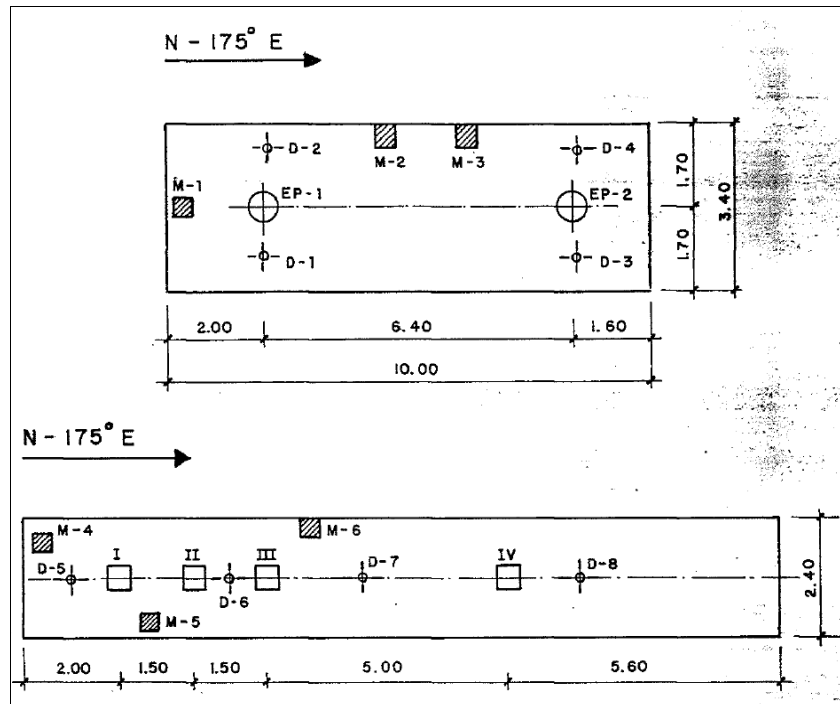
Las características geotécnicas observadas más importantes fueron una capacidad portante baja, alterabilidad muy alta (especialmente en presencia de agua), plasticidad también muy alta y permeabilidad prácticamente nula. Los materiales presentaban una ripabilidad fácil.

### 3.1.1.2 Zanja III (Z-III)

Esta obra se emplazó en las inmediaciones del puerto de Bolonia (UTM: 253.980; 3.998.629) sobre materiales de la Unidad de Almarchal, a unos 40 m del pozo de Bolonia (véase apartado 3.1.2). En este emplazamiento se realizaron dos zanjas paralelas de 10 y 15,6 m cada una, con dirección N175°E como puede observarse en la Figura 3-5.

Los materiales excavados se componían de argilitas pizarrosas grises con grados variables de fisuración. La mayor fisuración se encontraba asociada a zonas con mayor contenido en arcilla. Se observó la presencia de algunas intercalaciones calizas de entre 5 y 40 cm de espesor.

Los planos de estratificación eran claramente visibles en las capas calcáreas, con orientaciones oscilantes entre 110/80 y 80/85. En el conjunto del macizo rocoso estos planos estaban poco preservados, con abundantes ondulaciones y plegamientos y escasa continuidad de las capas argilíticas.



I, II, III, IV: ensayos de corte directo *in situ*; EP: ensayo de carga con placa; M: muestra inalterada; D: medida de la densidad *in situ*

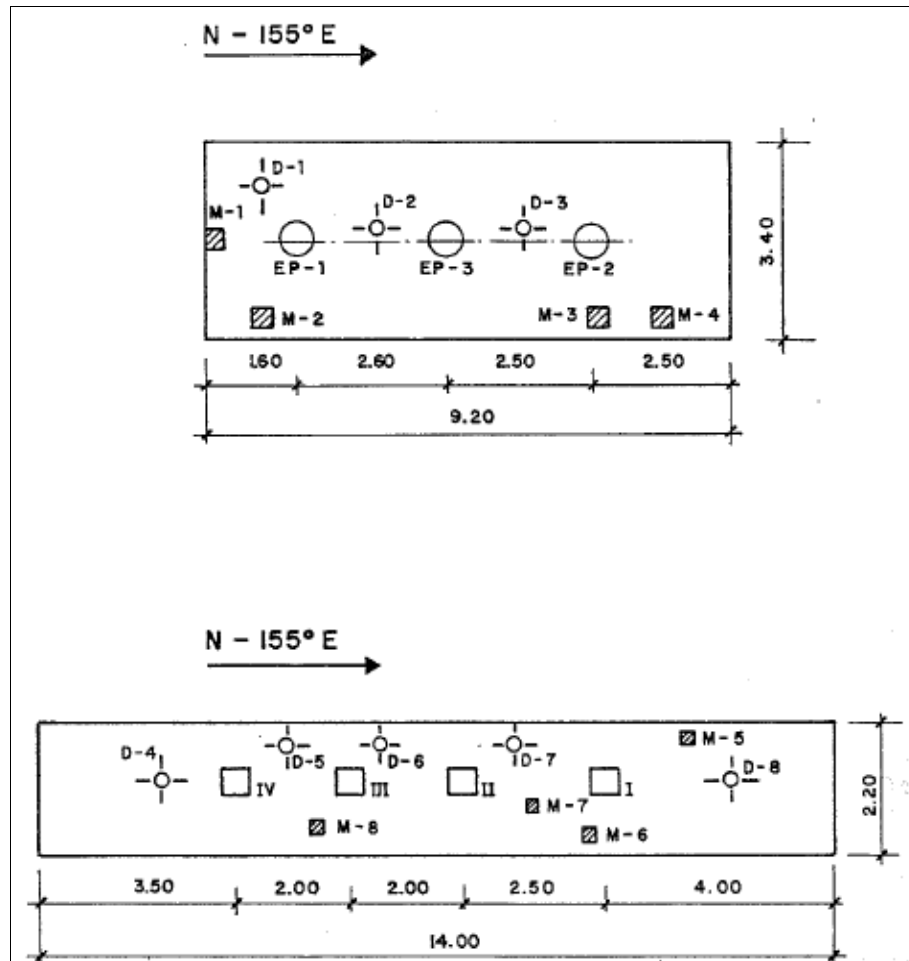
Figura 3-5. Esquema y situación de los ensayos en la zanja Z-III (CEDEX, 1985b)

Los trabajos realizados en esta zanja constaron de cuatro ensayos de corte directo *in situ*, dos ensayos de carga con placa verticales, ocho determinaciones de densidad *in situ* por el método de la arena y la toma de seis muestras inalteradas en bloque.

### 3.1.1.3 Zanja IV (Z-IV)

Esta zanja se emplazó en las inmediaciones de la localidad de Tahivilla en el paraje denominado Cortijo de la Haba (UTM: 254.650; 4.011.650) sobre materiales de la Unidad de Almarchal.

Al igual que en la Z-III, en esta localización se excavaron dos zanjas paralelas del modo que se observa en la Figura 3-6.



I, II, III, IV: ensayos de corte directo *in situ*; EP: ensayo de carga con placa; M: muestra inalterada; D: medida de la densidad *in situ*

D:

Figura 3-6. Esquema y situación de los ensayos en la zanja Z-IV (CEDEX, 1985b)

Los ensayos realizados en este emplazamiento consistieron en tres ensayos de carga con placa verticales, cuatro ensayos de corte directo *in situ*, ocho determinaciones de densidad *in situ* y en la toma de ocho muestras inalteradas en bloque. Los emplazamientos de cada uno de estos ensayos pueden verse en la Figura 3-6.

En la excavación se encontró una capa superficial de suelo y roca alterada que alcanzaba hasta unos 3 m de profundidad. Bajo esta capa se describieron unas argilitas gris verdosas y azuladas con escasas intercalaciones de argilitas más competentes. La fisuración es variable, con zonas altamente fisuradas, aunque de manera general esta es de grado bajo y medio. Las superficies de discontinuidad son, por lo general, lisas y brillantes.

La estratificación es variable aunque puede darse, de manera general, una orientación aproximada de 260/15 a 260/30.

En conjunto, los materiales son blandos y de fácil ripabilidad. En el informe se destaca una familia de diaclasas muy uniforme, con espaciamiento entre 20 y 50 cm y con orientación 140/40 (CEDEX, 1985b).

### 3.1.1.4 Zanja V (Z-V)

Este emplazamiento se situó en la población del Pulido, en la ladera sureste del arroyo del Pulido (UTM: 252.900; 3.999.000), en materiales pertenecientes a las Pelitas rojas de la Unidad de Bolonia.

En este emplazamiento se realizaron dos ensayos de carga con placa de 45 cm de diámetro, cuatro ensayos de corte directo *in situ*, seis determinaciones de densidad *in situ* y la toma de cinco muestras inalteradas en bloque (Figura 3-7).

En el informe de los trabajos realizados en este emplazamiento (CEDEX, 1987a) se registra el siguiente perfil del terreno:

- 0 – 1,80 m: Coluvión arcilloso con gravas, bolos y bloques de arenisca o caliza. Color marrón claro.
- 1,80 – 3,70 m: Limolitas, limolitas arcillosas y arcillas de color rojizo o gris verdoso, alteradas con microfisuración generalmente intensa (roca alterada).
- 3,70 m – fin: Limolitas y limolitas arcillosas de color rojizo, micáceas, duras y consolidadas, que se disgregan en formas nodulosas de tamaño grava en las áreas poco tectonizadas. Grado de tectonización irregular con frecuentes zonas intensamente microfisuradas (3-5 fisuras/cm).

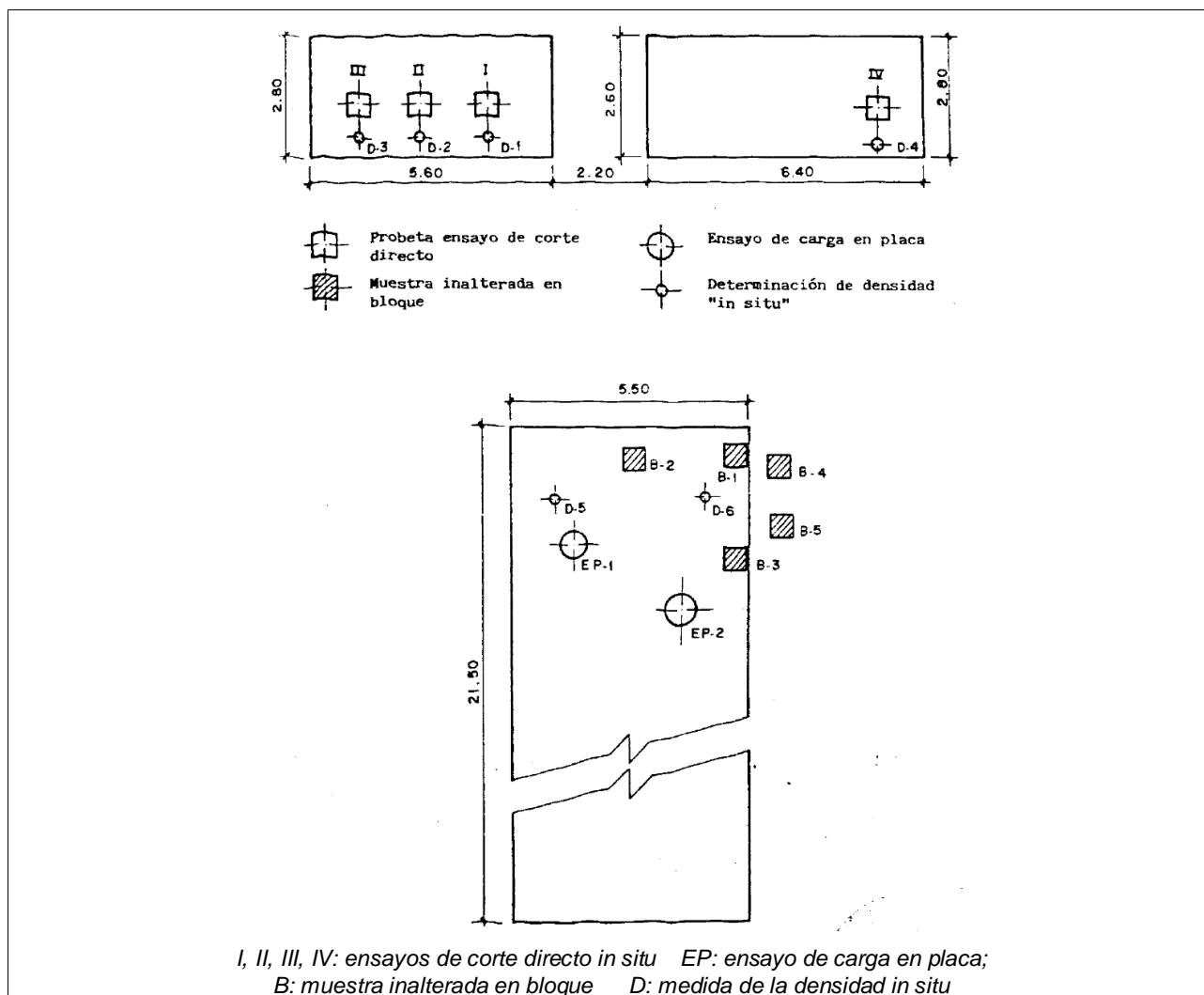


Figura 3-7. Esquema y situación de los ensayos en la zanja Z-V (CEDEX, 1987a)

### 3.1.1.5 Zanja VI (Z-VI)

Esta zanja se realizó en las inmediaciones de la población de Bolonia, concretamente en El Lentiscar (UTM: 251.580; 3.996.620). Los materiales ensayados pertenecen a la serie basal de la Unidad de Bolonia.

Los ensayos realizados en este emplazamiento constaron de: dos ensayos de carga vertical con placa de 45 cm de diámetro, cuatro ensayos de corte directo *in situ*, ocho determinaciones de densidad y la toma de cuatro muestras inalteradas en bloque (Figura 3-8).

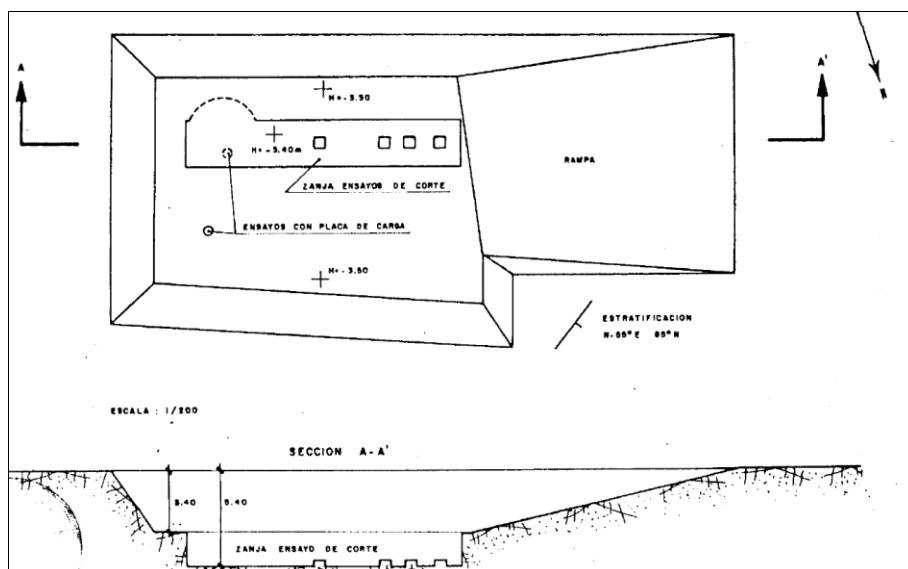


Figura 3-8. Esquema y situación de los ensayos en la zanja Z-VI (CEDEX, 1987a)

En el informe de los trabajos se recoge el siguiente perfil geológico (CEDEX, 1987a):

- 0 – 1,0 m: Arenas arcillosas rojas o marrones con bolos y bloques (suelo de alteración sobre una pequeña capa de materiales plio-cuaternarios).
- 1,0 – 2,2 m: Roca alterada. Argilitas y argilitas algo limosas muy alteradas y plásticas con eventuales fragmentos duros, y restos de capas areniscosas, pertenecientes a la Formación Cretácico superior de la Unidad de Bolonia. Cabeceo de los estratos muy acusado por fluidificación.
- 2,2 m – fin: Argilitas y argilitas algo limosas bien estratificadas en capas de color rojizo y gris verdoso con espesores que oscilan entre 10 y 70 cm; compactas, consolidadas y fisuradas (roca blanda). Esporádicamente se intercalan entre estos materiales capas más duras y de grano más grueso de tipo arenisca o arenisca calcárea entre 15 y 35 cm de espesor con un volumen total no superior al 5 % de la masa rocosa en este emplazamiento. Rocas duras, fisuradas y de notable continuidad estratigráfica. Destaca la presencia muy común de impregnaciones negras ferruginosas. Eventuales capas alteradas de color amarillento y escaso espesor siguen la orientación de la estratificación.

La orientación de las capas, de manera general, se midió como 325/85. La estructura presentaba una escasa uniformidad. El grado de fisuración que presentaban las argilitas era moderado, con una laminación bien marcada que constituía importantes planos de debilidad.

La estabilidad de los materiales frente a la excavación se definió como “*pésima*”. Durante la excavación de la zanja para la realización del ensayo de corte directo se produjo un corrimiento del terreno, lo que obligó a ampliar la excavación hasta los 15 m de longitud con una

profundidad media de 2 m y una anchura de 2,50 m. Tras la retirada de las entibaciones, el hundimiento de los materiales fue inmediato.

### **3.1.2 Pozo de Bolonia**

En este pozo se pretendió estudiar las características tenso-deformacionales de la Unidad de Almarchal (Tanger). Su excavación comenzó el 8 de junio de 1993 y terminó el 5 de octubre del mismo año.

El emplazamiento se sitúa en el paraje denominado Puerto de Bolonia, en el municipio de Tarifa (UTM: 253.957; 3.998.624). La localización se eligió por el buen conocimiento de la geología de la zona, la buena continuidad de la Unidad Almarchal en este punto y por las desfavorables características geomecánicas que presentaban los materiales.

El pozo se sitúa a unos 40 m de la zanja de ensayos Z-III y cerca de los sondeos S-1 y S-1 BIS (véanse apartados 3.1.1.2 y 3.2.1.1).

En el punto de excavación, la litología está formada por argilitas grises con intercalaciones de calcarenitas, calizas margosas y margas en bancos con espesor entre 10 y 60 cm, cuya representación total en el volumen de excavación es del orden de un 6 %. La sucesión estratigráfica aparece invertida con buzamientos de 30° a 75°, llegando en alguna ocasión (entre 64 y 65 m) a un vuelco de la serie con buzamiento horizontal. El macizo rocoso se encuentra fuertemente tectonizado. Las arcillas y margas aparecían frecuentemente brechificadas en escamas con superficies lisas y contenían minerales de arcilla de neoformación en las zonas distensivas (SECEG, 1994d).

#### **3.1.2.1 *Características constructivas***

El diámetro exterior del pozo es de 3,5 m y su profundidad total fue de 74 m. En la Figura 3-9 pueden verse las dimensiones previstas en proyecto.

El pozo se proyectó en 4 zonas diferenciadas a fin de estudiar el comportamiento de la excavación con diferentes sostenimientos. La primera zona desde 0 a 10 m presentaba un revestimiento rígido, a modo de antepozo y zona de seguridad. El resto de la excavación se dividió en tres tramos experimentales de 20 m cada uno. El primero de los 10 a los 30 m; el segundo de 30 a 50 m y el tercero de 50 a 70 m (Figura 3-9).

Cada uno de los tramos experimentales se dividió a su vez en dos zonas: una superior de 16 m de longitud en la que se colocó un revestimiento flexible, y una zona inferior de 4 m en la que se colocó un revestimiento rígido. La zona flexible estaba encaminada a la medida de deformaciones o convergencias mientras que la zona rígida permitía la medida de empujes horizontales del terreno.

Una vez alcanzada la profundidad definida por el proyecto (70 m), a la vista de la buena respuesta del terreno, se decidió continuar la excavación hasta los 74 m. Este último tramo se dejó sin revestimiento para estudiar el comportamiento real del terreno sin ninguna interferencia y observar su comportamiento y alterabilidad a largo plazo.

### 3.1.2.2 Método de excavación

La excavación se realizó en su totalidad con maquinaria convencional sin ser necesario, en ningún momento, el empleo de explosivos.

El primer tramo, entre 0 y 9 m se excavó mediante pala excavadora recurriéndose a martillo neumático para pasar sendas capas calcáreas localizadas a 3 y 7 m de profundidad.

Desde los 9 m hasta el final del pozo (74 m) se recurrió al martillo neumático como herramienta principal de excavación. Los niveles calcareníticos, si bien duros, debido a su elevada fracturación permitían su excavación sin excesivos esfuerzos. En cambio, las zonas de calizas margosas, debido a su escasa fracturación, presentaron mayor dificultad pese a su menor resistencia (SECEG, 1994d).

Los pases de excavación fueron de 1 a 2 m de máximo. Estas pequeñas longitudes sin revestimiento no se debieron a problemas de estabilidad, sino a la comodidad que presentaba el gunitado desde el fondo de la excavación. La aplicación del hormigón proyectado desde esta posición disminuía los rebotes del material y mejoraba el estado final del revestimiento.

A lo largo de todo el proceso de excavación no se observó ningún tipo de agrietamiento en el sostenimiento que sugiriera inestabilidad alguna, incluso con el exiguo espesor de gunita utilizado. No fue necesaria en ningún punto del pozo la utilización de refuerzos en el sostenimiento.

### 3.1.2.3 Sostenimientos utilizados

Con el objetivo de estudiar varios sostenimientos en el material se proyectaron diferentes espesores de gunita en los tres tramos experimentales flexibles:

- El primer tramo flexible entre los 10 y 26 m de profundidad fue sostenido mediante un espesor de 3 cm de hormigón proyectado reforzado con fibras de acero y con malla electrosoldada 100x100x8 mm.
- El segundo tramo entre 30 y 46 m fue sostenido con 5 cm de gunita con fibras de acero con malla electrosoldada 100x100x8 mm.
- El tercer tramo flexible entre 50 y 66 m se sostuvo con 10 cm de gunita con fibras de acero con malla electrosoldada de 100x100x8 mm.

Los últimos 4 m de perforación se sostuvieron de la siguiente manera:

- El tramo comprendido entre 70 y 71 m fue revestido con 3 cm de hormigón proyectado reforzado con fibras de acero.
- El último tramo del pozo, entre los 71 m y el fondo (74 m) permaneció sin revestimiento durante el mes posterior a su excavación sin observarse durante este tiempo signo alguno de inestabilidad. Con motivo de la abundante entrada de agua por la boca del pozo, tras un importante episodio de lluvias, se produjo, un mes después del fin de la excavación, un desprendimiento de moderada importancia a unos 72 m. Esto obligó a aplicar 3 cm de gunita sin mallazo en el tramo no revestido.

Como se indicó anteriormente, al emboquille del pozo se le aplicó un revestimiento rígido compuesto por 30 cm de hormigón (HA-250) encofrado, armado con doble mallazo electrosoldado 100x100x8 mm.

En los anillos rígidos, situados a 26, 44 y 66 m respectivamente, el sostenimiento se basó en 20 cm de hormigón proyectado y mallazo doble electrosoldado 100x100x8 mm.



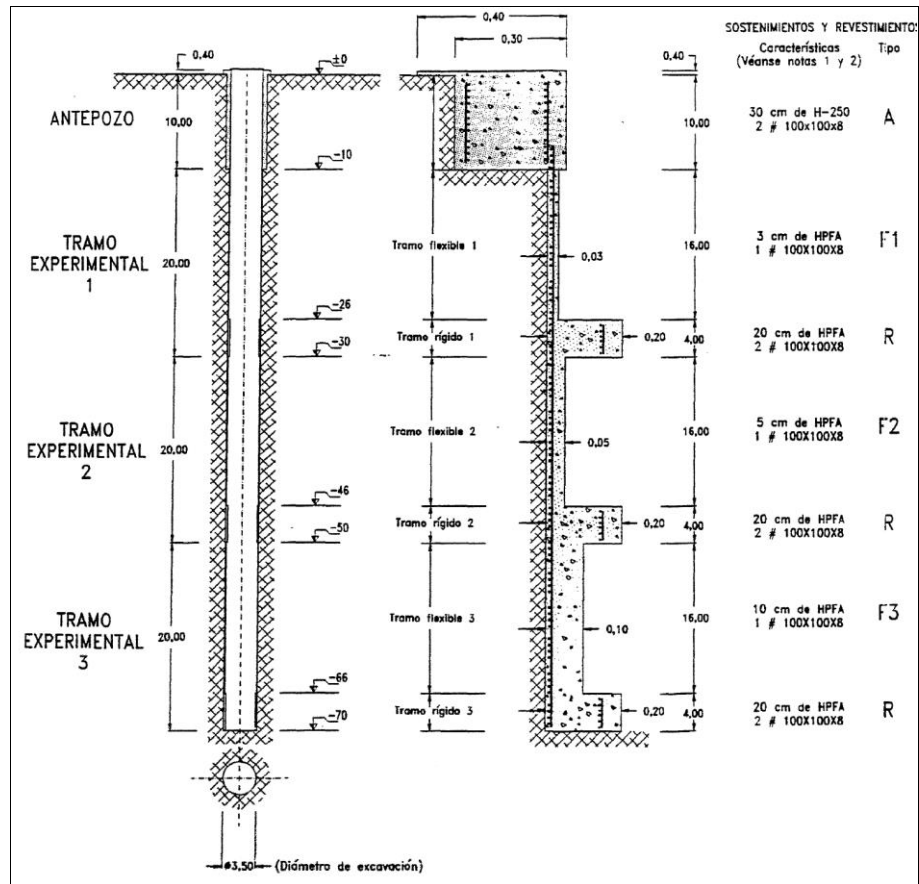


Figura 3-9. Sección, planta y esquema de sostenimientos del pozo experimental de Bolonia (SECEG, 1994e).

#### 3.1.2.4 Instrumentación empleada

A fin de obtener la mayor cantidad de datos posibles de la excavación se diseñó una instrumentación que constaba, según puede verse en el esquema de la Figura 3-10, de clavos de convergencia, células de presión total y extensómetros:

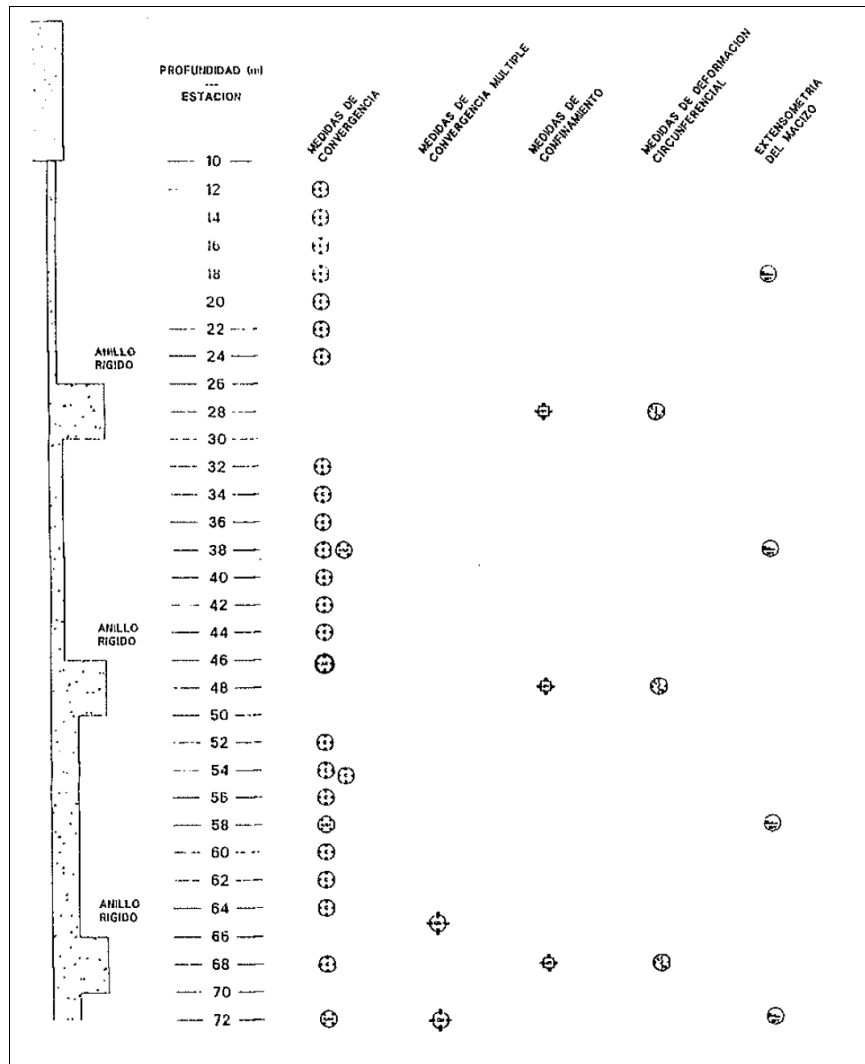


Figura 3-10. Esquema de la instrumentación colocada en el Pozo experimental de Bolonia. Tomada de SECEG (1994e)

#### - Clavos de convergencia para medida de deformaciones:

Los clavos de convergencia han servido para la medida de las deformaciones en las zonas con revestimiento flexible. Se colocaron un total de 22 estaciones situadas cada 2 m de profundidad en los tramos flexibles. Cada estación constaba de 4 clavos situados según los 4 puntos cardinales (N-E-S-O).

#### - Células de presión total y extensómetros de cuerda vibrante:

Estos dispositivos fueron colocados para la medida de los empujes horizontales en las zonas con sostenimiento rígido. Los extensómetros median deformaciones circunferenciales en los anillos rígidos. Se colocaron 3 estaciones de medida, una en el centro de cada tramo rígido (28, 48 y 68 m). Cada estación constaba de 4 células situadas según los 4 puntos cardinales (N-E-S-O).

### **- Extensómetros de varilla:**

Estos dispositivos sirvieron para medir la evolución de las deformaciones a diferentes distancias de la excavación. Se instalaron 3 estaciones colocadas en el centro de los tramos flexibles (18, 38 y 58 m). Cada estación constaba de 4 sondeos horizontales orientados con direcciones (NE-SE-SO-NO). En cada uno de los sondeos se colocaron tres extensómetros de varilla, anclados individualmente a 1, 3 y 5 m respectivamente.

### **- Extensómetros de cable:**

En las primeras medidas realizadas en los extensómetros de varilla se observó que estos reportaban datos incongruentes. Por ello se procedió a la instalación de una última estación a 72 m, esta vez con extensómetros de cable con anclaje mecánico (SECEG, 1994d). Esta estación contaba con 4 extensómetros por sondeo anclados a 0,7; 1,5; 3 y 5,8 m.

#### *3.1.2.5 Análisis de los datos obtenidos de la instrumentación*

Las presiones de confinamiento medidas en los anillos rígidos (-28, -48 y -68 m) aportan gran variabilidad. Debido al reducido número de datos es difícil obtener conclusiones claras. En el conjunto de datos no se aprecia una anisotropía clara en cuanto a este parámetro.

Las tensiones medidas en el anillo situado a -48 m parecen indicar una compresión mayor en dirección E-O mientras que en el anillo situado a -68 m esta compresión máxima parece situarse en dirección N-S. Por tanto, como se menciona en el párrafo anterior, no se pueden extraer conclusiones en lo referente a este aspecto. La variabilidad de los datos y la falta de certeza, en cuanto a la existencia o no de concentraciones de presiones puntuales, en las zonas en las que se sitúan las células de presión, hacen que sea difícil incluso dar un rango amplio para las presiones existentes en el punto de ejecución del pozo.

En cuanto a la medida de las deformaciones, las máximas convergencias se midieron en las estaciones situadas entre 32 y 40 m de profundidad, es decir, la zona 2 mostró mayores deformaciones que las otras dos zonas. La falta de datos geomecánicos de detalle, en función de la profundidad de la excavación, impide concluir cuál fue la causa de esta mayor deformabilidad.

El primer análisis de los resultados de la instrumentación (Eisenstein, 1994) se basó, principalmente, en el análisis de los datos de convergencia al ser los más numerosos y permitir un análisis global del pozo. Este trabajo comparaba, en base a modelizaciones realizadas con el método de convergencia-confinamiento (MCC) y mediante análisis por elementos finitos (FEA) diferentes modelos de comportamiento del terreno. De los modelos analizados el que, según el autor, mejor representa el comportamiento del terreno, en base a los datos aportados por la instrumentación, es el modelo hiperbólico (Hartmann, 1970). Los parámetros calculados con los modelos elástico lineal y elástico-plástico perfectos muestran gran similitud debido, según el autor, a la escasa plastificación sufrida por los materiales circundantes a la excavación.

#### *3.1.2.6 Ensayos presiométricos*

Una vez terminada la excavación se realizaron 4 sondeos sin recuperación de testigo, de pequeña longitud a fin de realizar en su interior ensayos presiométricos.

Dos de los sondeos se hicieron verticales en la base del pozo y otros dos horizontales en las paredes.

Según se indica en SECEG (1994d) las perforaciones fueron afectadas por el agua durante un episodio de lluvias intensas antes de la ejecución de los ensayos. Esto lleva a pensar que las condiciones de ejecución de los ensayos no fueron las óptimas y, por tanto, que los datos aportados por estos no son del todo fiables.

#### 3.1.2.7 Toma de muestras

Entre los 36 y 69 m de profundidad se realizaron varios sondeos cortos, de manera perpendicular al paramento, ejecutados en seco, para la obtención de muestras inalteradas. Estas muestras fueron llevadas a laboratorio para su posterior ensayo (véase apartado 3.4.4.4).

#### 3.1.2.8 Clausura del pozo

El pozo fue clausurado a finales de enero del año 2000 debido a un importante hundimiento producido a principios del mismo mes (SECEG, 2000).

En el pozo se apreció una colmatación a partir de los 15 m sin que se hayan realizado pruebas posteriores que determinen con precisión el espesor de los materiales colmatados. En superficie se apreció un socavón de unos 4 m de diámetro, y aproximadamente 7 m de profundidad, unos 4 m al sureste del pozo (Figura 3-11). Este hueco fue progresando con los días hasta que se procedió al relleno y clausura definitiva de la obra.

A finales del mes de enero de 2000 se procedió al relleno del pozo y del socavón originado. Se recurrió al propio material de excavación que se situaba en una escombrera cercana. El volumen total de material utilizado fue de unos 16 m<sup>3</sup>.

Si bien no está totalmente aclarado, según el informe de la clausura de la excavación (Esteras, 2000), el hundimiento parecía haberse producido en los últimos metros del pozo (70-74 m). Posteriormente el desplazamiento de los materiales habría progresado en forma de chimenea hasta ser apreciable en superficie.



Figura 3-11. Fotografía de 24 de enero de 2000 en la que se aprecia el socavón junto al brocal del pozo (Esteras, 2000).

#### 3.1.2.9 Conclusiones

Como conclusiones generales que pueden ser extraídas del análisis del pozo experimental de Bolonia pueden apuntarse las siguientes:

- Las características de la Unidad de Almarchal resultaron ser algo mejores de lo esperado.
- La Unidad presenta una buena excavabilidad por medios mecánicos. No se precisa recurrir a explosivos.
- Los materiales atravesados presentan una muy baja permeabilidad, lo cual facilitará las labores de construcción del futuro túnel.
- No existe un buen conocimiento de las tensiones *in situ* existentes en la zona estudiada lo cual dificulta la interpretación de los datos aportados por la instrumentación.
- Según el estudio realizado por Eisenstein (1994), los materiales estudiados presentan un comportamiento cercano al modelo hiperbólico y la plastificación sufrida durante la excavación fue escasa.
- Las causas y localización del derrumbe producido en el túnel, y que llevó a su clausura, no han sido esclarecidas por lo que no se pueden sacar conclusiones definitivas de este hecho.

### 3.1.3 Galería experimental de Tarifa

Esta galería fue excavada en el año 1995 a fin de estudiar *in situ* el comportamiento de varias de las unidades involucradas en el proyecto del túnel del Estrecho.

La galería cuenta con 3,8 m de diámetro y 572 m de longitud siguiendo una dirección NNO (N20°O). Se encuentra en el término municipal de Tarifa (Cádiz). La boca de la galería se sitúa a la altura del p.k. 87+200 de la N-340 (UTM: 268.366, 3.990.440). La elección de este punto se debió a que esta permitía estudiar varias litologías de las unidades de Algeciras y Almarchal, así como una zona de falla con cierto interés geotécnico.

#### 3.1.3.1 Geología

La Galería Experimental de Tarifa atraviesa las unidades más representativas que afecta al Enlace Fijo del Estrecho de Gibraltar como son las unidades de Algeciras, Almarchal y Bolonia (Figura 3-12).

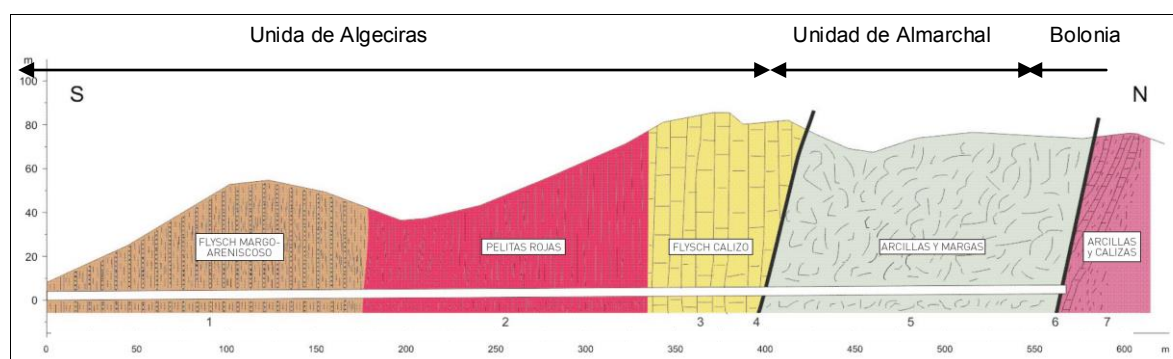


Figura 3-12. Corte esquemático de la Galería de Tarifa (SECEG)

En la Unidad de Algeciras se atraviesan tres términos litológicos diferenciados, que de muro a techo son:

- Flysch margo-areniscoso-micáceo: compuesto por paquetes decimétricos de argilita algo limosa sana de color gris con intercalaciones de arenisca calcárea y limolita arcillosa. En esta zona aparece con una estratificación subvertical. La fracturación observada es escasa,

principalmente asociada a laminación paralela a la estratificación. Los planos son lisos y algo escalonados, normalmente cerrados y sin relleno. En cuanto al RMR de esta zona se sitúa entre 47 y 66, correspondiente con un macizo rocoso de calidad media a buena (Bieniawski, 1989). Este tramo se corta desde el inicio de la galería experimental hasta el punto 0+180; produciéndose, desde el punto 0+175, una transición con el siguiente tramo.

- Pelitas rojas: secuencia compuesta por paquetes de argilita rojiza sana con intercalaciones centimétricas de calcarenita gris de grano fino. En la zona de la galería la estratificación aparece subvertical. La fracturación es muy escasa. La mayoría de las discontinuidades se corresponden con planos de estratificación y laminación y presentan contactos lisos y brillantes. Los valores de RMR medidos son muy homogéneos y varían entre 51 y 61, correspondiente con un macizo rocoso de calidad media (Bieniawski, 1989). Se localiza entre el punto 0+175 hasta el 0+360.
- Flysch calcáreo: constituido principalmente por calcarenitas grises y ocreas con intercalaciones margosas y niveles argilíticos. En esta localización los materiales presentan una baja calidad geomecánica con abundante fracturación y niveles de falla. Son abundantes las fracturas cerradas con relleno de calcita así como las texturas brechoides. En ocasiones las paredes de las fracturas aparecen algo alteradas y con rellenos terrígenos o arcillosos. La estratificación es subvertical. Los valores de RMR medidos varían entre 26 y 51, correspondiente con un macizo rocoso de calidad mala a media (Bieniawski, 1989). Se atraviesa desde el punto 0+335 hasta el 0+400.

El contacto entre la Unidad de Algeciras y la de Almarchal se produce por medio de una falla de desgarre con dirección N70°E y que buza 60° hacia el sur, situada en el punto 0+400. Esta queda manifestada por la presencia de una zona brechificada constituida por bloques decimétricos a métricos de calcarenita dentro de una matriz heterométrica compuesta por arcillas rojas y calcarenitas (Martín Ruíz, 1997).

La Unidad de Almarchal está compuesta por arcillas grises tectonizadas y margas microfisuradas. Se han diferenciado dos tramos. El primero de marcado carácter arcilloso, está formado por arcillas grises y rojas muy tectonizadas, con bloques aislados, decimétricos a métricos, de calcarenitas. Se han atravesado desde el 0+400 hasta el 0+480. Desde el 0+480, la composición de la unidad se vuelve más margosa, con arcillas grises tectonizadas y margas microfisuradas.

Este tramo termina con una falla de desgarre cuya composición es similar a la anterior, diferenciándose únicamente su dirección, siendo en este caso N50°E en el punto 0+560.

La Unidad de Bolonia está formada por bancos de calcarenitas y arcillas. Se ha atravesado solo en los 10 últimos metros de la galería (0+560 hasta 0+570).

### 3.1.3.2 Características constructivas

La Galería Experimental tiene una sección circular con radio de 3,8 m. Para su excavación se utilizó una máquina tuneladora a sección completa (TBM) sin escudo, marca ROBBINS modelo 122-126, con capacidad de operar apoyándose exclusivamente en el terreno mediante zapatas de presión.

Se construyeron cinco anillos rígidos para medir empujes del terreno. Cada uno de unos 5 m de longitud. Estos anillos rígidos se localizan en los pp.kk. 0+090, 0+220, 0+272, 0+436 y 0+500.

### 3.1.3.3 Sostenimiento

El sostenimiento colocado esta constituido por mallazo electrosoldado, de 100x00x8 mm, hormigón proyectado con fibras de acero, bulones de acero corrugado, de 25 mm de diámetro, 1,5 m de longitud, de anclaje repartido mediante resina y cerchas UPN-120. A lo largo de toda la galería se ha construido una solera de hormigón.

En la siguiente Tabla 3-1 se muestran los sostenimientos tipo utilizados:

Tabla 3-1. Tipos de sostenimiento utilizados (Geocontrol, 1995c).

Tipo	Numero de mallas	Bulones	Cerchas	Gunita (cm)
S-0	1	5 cada 1,5 m	-	-
S-6	1	-	-	6
S-12	1	-	Cada 1 – 0,6 m	12
S-20	2	-	-	20
S-20*	1	-	Cada 1 – 0,6 m	20

Los anillos rígidos se sostuvieron mediante 20 cm de hormigón proyectado de 25 MPa, reforzado con doble mallazo electrosoldado de 100x100x8 mm.

### 3.1.3.4 Instrumentación

A lo largo de la galería se han colocado 62 secciones de medida de convergencias, siguiendo, en cada una de ellas, el esquema representado en la Figura 3-13.

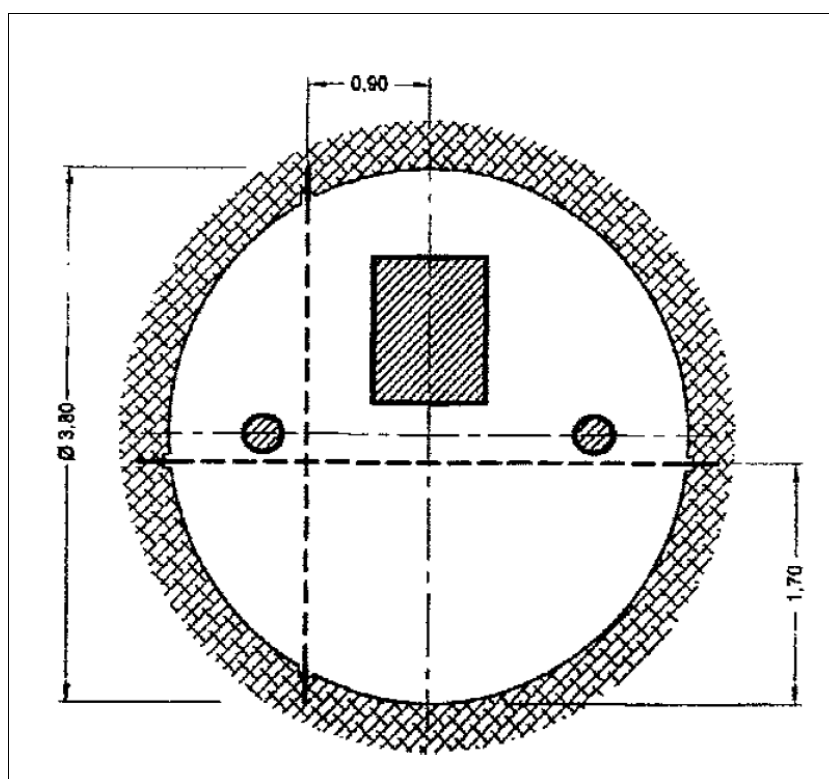


Figura 3-13. Esquema de la posición de los pernos de medida de convergencias (Martín Ruíz, 1998)

Las estaciones de medida se han dividido entre las diferentes litologías de la siguiente manera:

- Flysch margo-areniscoso micáceo (0 – 175 m): 13 estaciones.
- Pelitas rojas (175 – 330 m): 15 estaciones.
- Flysch calcáreo (330 – 399 m): 5 estaciones.
- Unidad de Almarchal (399 – 553 m): 27 estaciones.
- Unidad de Bolonia (556 – 567 m): 2 estaciones, una para control del frente.

En los anillos rígidos la instrumentación constaba de:

- 4 células de presión total marca Soil Instruments, modelo 6P y precisión 0,1 % y con extensómetros de cuerda vibrante marca Soil Instruments. En cada anillo rígido se ha colocado una caja estanca para la conexión de los terminales y facilitar las lecturas.
- 4 extensómetros de cuerda vibrante.

En la Figura 3-14 se puede observar la disposición de estos elementos.

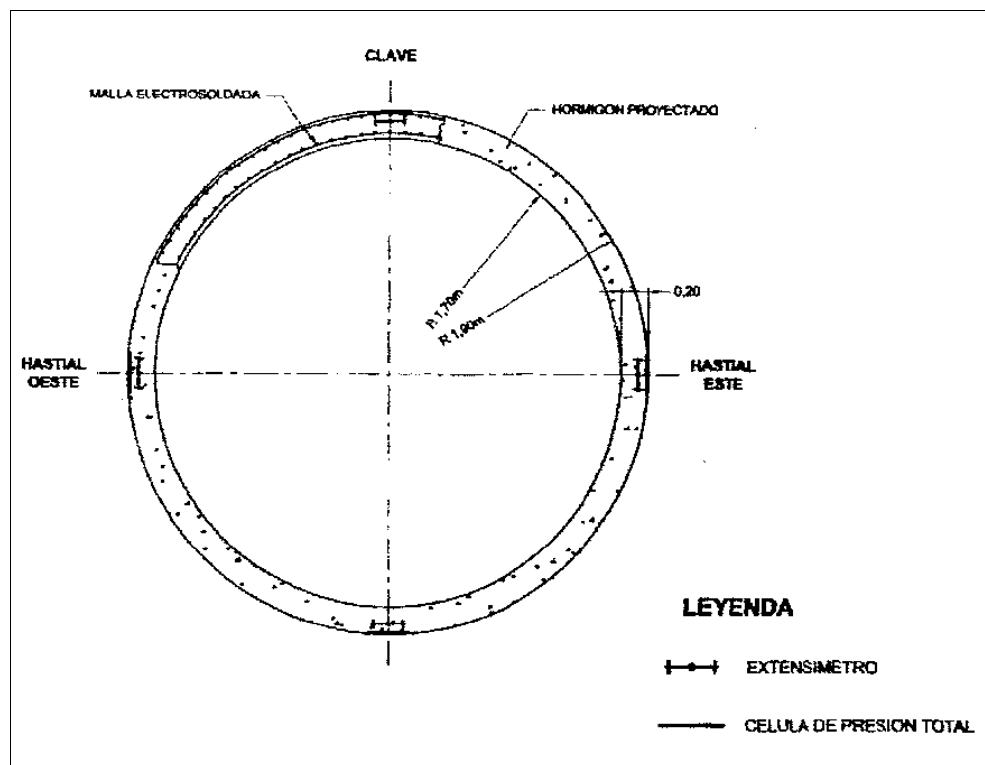


Figura 3-14. Esquema de la instrumentación de los anillos rígidos (Martín Ruíz, 1998).

Además de las secciones de convergencia y de los cinco anillos rígidos, se ha instrumentado una cercha UPN-120 colocando tres células de presión en su trasdós y proyectando, posteriormente sobre ella 12 cm de hormigón reforzado con fibras de acero. Esta cercha se sitúa en el p.k. 0+543,9.

### 3.1.3.5 Utilización actual

Actualmente la galería de Tarifa sigue en uso y con un estado de mantenimiento óptimo. La toma de datos de su instrumentación se sigue realizando de manera periódica. Del mismo modo se ausculta cualquier movimiento anómalo producido a fin de controlar el comportamiento de los materiales a largo plazo.



También sirve para la realización de ensayos en las unidades excavadas. La última campaña realizada aquí fue la llevada a cabo en 2012 por el CEDEX y SECEG y forma parte de esta tesis doctoral. Esta campaña se recoge en el capítulo 4.

Se utiliza, de manera secundaria, como almacén para los testigos de sondeos de las diferentes campañas realizadas dados su ambiente controlado y su saturación, cercana al 100 % durante todo el año.

### **3.1.4 Galerías y pozos de Malabata**

En 1995 se excavó el complejo de pozos y galerías de Malabata. Situada en la orilla marroquí del Estrecho, esta obra singular, permitió la realización de un extenso estudio de los materiales involucrados en el proyecto de enlace fijo. Las dimensiones de la obra posibilitan un estudio a escala real del comportamiento de los materiales.

Este complejo se situó en el cabo de Malabata, al este de la ciudad de Tánger (Marruecos). Las coordenadas UTM de la boca del pozo de entrada son: 252.750, 3.967.449. El pozo se sitúa cerca de los sondeos GEO-3 y a unos 23 m del sondeo SB-3 (véanse apartados 3.2.2 y 3.2.3).

Los principales objetivos de esta actuación eran (Chraïbi *et al.*, 1995):

- Determinar las características geotécnicas, a corto y largo plazo, de los materiales excavados.
- Determinar las tensiones *in situ* de la zona.
- Estudiar el comportamiento de los materiales frente a la excavación a largo plazo.
- Probar sostenimientos.
- Efectuar un reconocimiento geológico detallado.
- Realizar estudios de la permeabilidad con especial interés en el paso por accidentes geológicos y zonas fracturadas.

El pozo de Malabata se sitúa, principalmente, en materiales pertenecientes a la Unidad de Algeciras. En la Figura 3-15 se presenta un corte geológico esquemático donde se muestran las diferentes litologías atravesadas por la galería (Hamoumi, 1995).

Estos materiales pertenecen a dos edades diferentes:

En la zona sur, y afectando a los primeros 100 m del pozo principal, se localizan materiales cretácicos de naturaleza arcillosa y calcarenítica. Estos materiales se presentan fuertemente alterados y fracturados en las zonas más superficiales.

Separados por un conjunto de fallas con un buzamiento de unos 65° hacia el sur se localiza la Unidad de Algeciras, que presenta una estructura homoclinal con un buzamiento general de unos 75° hacia el norte. En profundidad se han descrito cuatro términos litológicos de la Unidad de Algeciras: flysch arcilloso, flysch calcáreo, pelitas rojas y flysch arenoso (Figura 3-15)

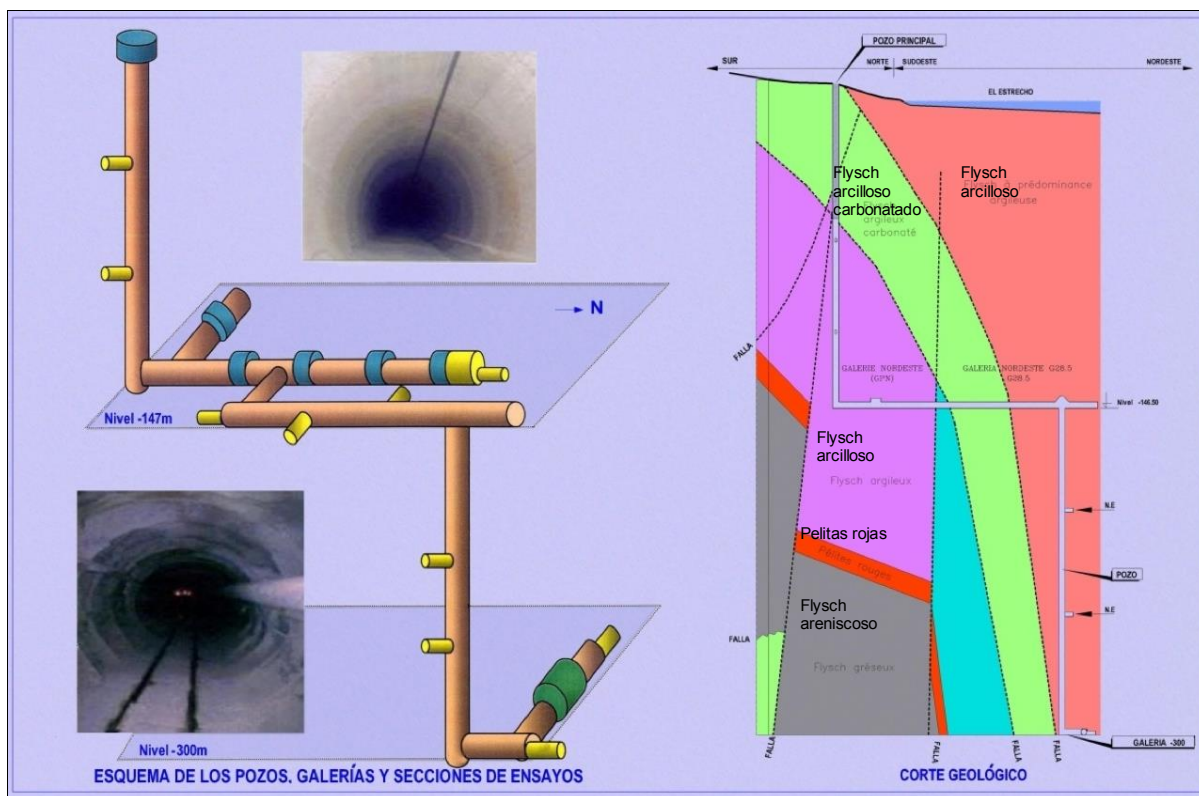


Figura 3-15. Esquema geológico del pozo y galerías de Malabata (SECEG)

#### 3.1.4.1 Características constructivas

Este complejo está formado por dos niveles de galerías (-147 m y -300 m) a los que se accede desde un pozo principal que, de manera vertical, conecta con la superficie. Los dos niveles se conectan mediante un segundo pozo, también vertical, que desciende desde una de las galerías del primer nivel (Figura 3-16).

El pozo principal tiene 160 m de profundidad y un diámetro de 2,5 m.

En la base del pozo arranca la galería principal, que desciende con una pendiente de  $1^\circ$  durante 98 m en dirección N y NE. A 28 m del inicio de la galería principal arranca la Galería Este con una longitud de 64 m en dirección NE. La galería oeste comienza a 7,5 m del inicio de la galería principal y cuenta con una longitud de 27 m en dirección oeste.

A partir de la Galería Este arranca un segundo pozo que, desde la cota -147 m, baja verticalmente hasta la cota -300 m.

En el nivel inferior (cota -300 m) está formado por una galería de 35 m de longitud en la que se sitúa una sección instrumentada de 7 m, equipada con un sistema de sostenimiento e instrumentación activo de sección completa (Sección *d'essai blindée*).

Las galerías presentan un diámetro de 3 m y permiten el acceso a las secciones de ensayo (SE en el esquema de la Figura 3-16) de 4,8 m de diámetro que permitieron la realización de ensayos geotécnicos como las pruebas de carga con placa.

Tanto el pozo principal como el segundo pozo y las galerías cuentan con nichos excavados a diferentes alturas realizados a fin de obtener muestras inalteradas y permitir la realización de ensayos *in situ*.

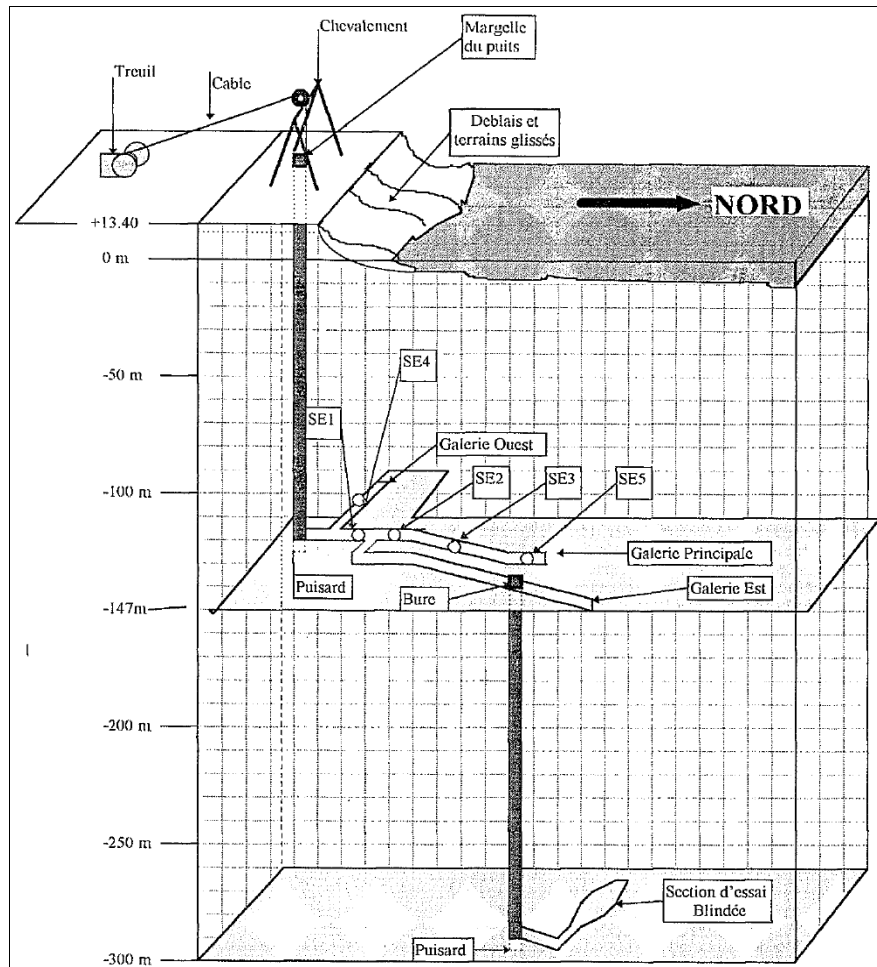


Figura 3-16. Esquema del complejo de pozos y galerías de Malabata (SNED, 1996)

### 3.1.4.2 Instrumentación

El pozo principal cuenta con clavos para la medida de las convergencias.

Las galerías fueron equipadas con secciones para la medida de convergencias en toda su longitud.

En las secciones de ensayo se colocaron además extensómetros, células de presión total y extensómetros de cuerda vibrante en el sostenimiento.

### 3.1.5 Pozo del Huerto de la Tabla

El proyecto de esta excavación fue redactado (Perez Moreno, 1991), con el título de “Primer pozo experimental en la orilla norte del Estrecho de Gibraltar (Pozo del Huerto de la Tabla)”.

Se proponía un pozo vertical, de sección circular, de 3,5 m de diámetro y una profundidad de 70 m. La excavación se realizaría en la finca Huerto de la Tabla a unos 3 km al NE de Tarifa, junto a la N-340, en una franja de materiales pertenecientes a la Unidad de Almarchal.

El eje del pozo estaría a unos 25 m del eje de la Galería experimental de Tarifa (véase apartado 3.1.3). En este punto, la Unidad Almarchal está limitada por dos fallas de desgarre que

la ponían en contacto con la Unidad de Algeciras al sur y con la Unidad de Bolonia al norte. El proyecto hace mención a las posibles tensiones *in situ* generadas por la actividad de estas fallas.

La caracterización geotécnica del macizo se realizó en base a los datos aportados por los sondeos SG-1 y SG-2, así como un tercer sondeo realizado en las inmediaciones. También se utilizaron datos de perfiles eléctricos, sondeos eléctricos verticales y sísmica de refracción. La testificación de estos sondeos reveló un macizo rocoso eminentemente arcilloso, muy fracturado y compuesto, mayoritariamente, por rocas blandas. Con un RQD de 0 % en todos los casos, RMR inferior a 14 y un valor de Q de 0,016, lo que indica una muy deficiente calidad geotécnica. En el interior del sondeo SG-2 se realizaron medidas de radiactividad natural, calibre y diagráfia sónica de onda completa. Las velocidades de propagación de ondas P aportadas por la sísmica (2270 m/s) y por la testificación sónica (2400 m/s) están en consonancia con la testificación del sondeo y recalcan la baja calidad geomecánica del macizo rocoso en este punto.

El sostenimiento propuesto en base al estudio geomecánico estaría compuesto por cerchas metálicas, mallazo reforzado y gunita.

Finalmente el pozo no llegó a realizarse por considerarse más interesante, desde el punto de vista técnico, la localización del Puerto de Bolonia donde se realizó el Pozo experimental de Bolonia (véase apartado 3.1.2).

## 3.2 Sondeos

Como parte principal de las labores de reconocimiento de los materiales involucrados en el estrecho de Gibraltar se han realizados una serie de campañas de perforación tanto en tierra como en el mar.

Teniendo en cuenta los trabajos realizados en las dos orillas del Estrecho se han realizado un total de 24 sondeos mecánicos con recuperación de testigo. Estos sondeos se agrupan en 3 campañas de perforación en tierra:

- Campaña 1982-1983 en la orilla española
- 1ª Campaña marroquí (1983)
- 2ª Campaña marroquí (1992)

Una de las mayores dificultades del proyecto del túnel bajo el Estrecho de Gibraltar es la toma de muestras bajo una mar con un elevado tráfico marino, fuertes corrientes y calados considerables. Salvando estas dificultades se han realizado siete campañas de perforación de sondeos bajo el mar en las que se han probado distintas técnicas con diferentes grados de éxito. En total se han perforado más de 3000 m de sondeos en siete campañas:

- Campaña Sea Nautilus (1991)
- Campaña Pholas (1992)
- Campaña Kommander Theresa (1994)
- Campaña Bevenit (1995)
- Campaña Buceantur (1997)
- Campaña Norskald (1998-1999)
- Campaña Kingfisher (2005)

### 3.2.1 Campaña 1982-1983

Esta campaña fue realizada por la compañía Agroman-Kronsa entre agosto de 1982 y septiembre de 1983. El principal objetivo de la misma era la ampliación y comprobación de los datos geológicos superficiales y el inicio del estudio de las características geotécnicas de los terrenos de la margen septentrional del Estrecho de Gibraltar, con vistas al dictamen de viabilidad de un enlace subterráneo, tipo túnel, entre las dos márgenes (SECEG, 1983a, 1983b). El desarrollo de esta campaña se centró únicamente en la orilla española (Figura 3-17).



Figura 3-17. Situación de los sondeos de la campaña 1982-1983

Dentro de esta campaña de reconocimientos se realizaron un total de ocho sondeos mecánicos con recuperación de testigo (Tabla 3-2).

Tabla 3-2. Sondeos pertenecientes a la campaña 1982-1983.

Sondeo	Denominación	Unidad	Profundidad (m)	UTM	
				x	y
S-1	Puerto de Bolonia	Almarchal - Bolonia	218,57	254.300	3.999.140
S-1 BIS	Puerto de Bolonia	Almarchal - Bolonia	302,30	244.300	3.999.140
S-2	Puerto de Facinas	Almarchal - Bolonia	230,80	255.960	4.002.625
S-3	Pista de Bétis	Bolonia - Almarchal	231,12	254.950	3.998.800
S-4	Cruce Facinas	Almarchal	108,13	255.700	4.004.400
S-5	Paloma Baja	Algeciras	400,00	255.340	3.994.610
S-7	Casas del Valle	Almarchal	150,00	256.250	3.999.990
S-9	Casas Palomas	Almarchal	58,00	255.100	3.995.225

#### 3.2.1.1 Sondeo S-1 y S-1 BIS

Estos dos sondeos fueron realizados en la misma localización. Por diversos problemas de perforación, el S-1 tuvo que ser abandonado a 219,7 m. Junto a este se decidió repetir la perforación (S-1 BIS), esta vez a destroza con tricono, hasta los 222 m para después continuar hasta los 302,3 m con recuperación de testigo. Las recuperaciones de la zona perforada con sonda testiguera son en general altas (Figura 3-18).

Los materiales perforados pertenecen a dos unidades diferentes: Unidad de Almarchal hasta los 270 m y Unidad de Bolonia hasta el fondo del sondeo. El contacto entre las dos unidades es concordante y progresivo.

Los materiales de la Unidad de Almarchal están formados por argilitas y margas de color gris, intensamente microfisuradas y replegadas, con diferentes grados de alteración (Figura 3-18). Aparecen algunas intercalaciones de caliza o calcarenita sin superar el 5 % del volumen total perforado.

Los materiales de la Unidad de Bolonia están compuestos por argilitas y argilitas limosas grises o marrón-rojizas con intercalaciones, más abundantes que en los materiales anteriores, de calizas y calcarenitas. Se ha descrito algún nódulo pirítico.

Desde el punto de vista geotécnico los materiales tienen un grado de fracturación alto, con RQD de 0 % en casi toda la columna, no superando prácticamente el 50 % a lo largo de todo el sondeo. El grado de alteración (GM) de las rocas está generalmente entre II y III con algunos niveles importantes de grado IV. Los planos de discontinuidad son lisos y brillantes con buzamientos preferentes en torno a los 40° o 50°.

El nivel piezométrico en este sondeo se situó en torno a los 18-20 m de profundidad. Tras ensayos de cucharéo y estudiando la recuperación del mismo se comprobó que los materiales son prácticamente impermeables (SECEG, 1983b).



Figura 3-18. Aspecto de los testigos del S-1. Caja 44 de 260,2 a 264,60 m (SECEG, 1983b)

#### 3.2.1.2 Sondeo S-2

Este sondeo se realizó sobre los mismos materiales que el sondeo S-1. Los primeros 30-40 m perforan la Unidad de Almarchal, pasando progresivamente a perforarse materiales de la Unidad de Bolonia.

Los materiales de la Unidad de Almarchal están compuestos por argilitas grises fisuradas con escasas intercalaciones calcareníticas (Figura 3-19). Estas rocas presentan un importante grado de microplegamiento y fisuración. Esta unidad presenta grados de alteración, exceptuando los primeros metros, que rondan el GM-III con algunos niveles de GM-II o GM-IV.

A partir de los 40 m aparecen materiales de la serie Cretácico-Eoceno de la Unidad de Bolonia formados por argilitas limosas de color marrón rojizo con frecuentes capas de calcarenita (Figura 3-20). Progresivamente el contenido en limos aumenta hasta pasar a limos marrón-



rojizos. El grado de alteración de estos materiales progresa de GM-III a GM-II con la profundidad llegando a presentar un GM-I en los últimos metros.

A la vista de los datos del sondeo se aprecia una peor calidad geotécnica de los materiales de la Unidad de Almarchal, con valores de RQD que raramente superan el 0 % salvo en los niveles calcareníticos más competentes. La Unidad de Bolonia presenta grados menores de fracturación manteniéndose por debajo del 50 % de media hasta los 170 m y aumentando hasta niveles cercanos al 100 % a partir de esta cota.

Las discontinuidades observadas son bastante irregulares y algo caóticas debido a la estructura de las unidades, si bien, de manera general se puede hablar de superficies lisas y brillantes. El buzamiento general de las capas ronda los 30° existiendo diferentes familias de fracturas con ángulos mayores.

En este sondeo se realizaron ensayos de permeabilidad recogidos en el apartado 3.3. El nivel piezométrico en este sondeo se situó en torno a los 25 m de profundidad.



Figura 3-19. Aspecto de los testigos de la Unidad de Almarchal en el S-2. Caja 9. (SECEG, 1983b)



Figura 3-20. Aspecto de los testigos de la Unidad de Bolonia en el S-2. Caja 33. (SECEG, 1983b)

### 3.2.1.3 Sondeo S-3

Este sondeo atraviesa materiales de la Unidad de Bolonia y a partir de 196 m con un contacto progresivo, materiales de la Unidad de Almarchal.

Los materiales están compuestos principalmente por argilitas con intercalaciones calcáreas escasas (Figura 3-21). Destaca un nivel de unos 20 m de espesor localizado a 103 m de profundidad compuesto por calcarenitas que presenta un comportamiento geotécnico mucho mejor que el de los materiales argilíticos, por lo general bastante fisurados y algo alterados.

El grado de fracturación del macizo es bastante alto. El RQD es de aproximadamente 0 % hasta los 25 m, cota a partir de la cual se observa una pequeña mejoría en los parámetros aunque el RQD no pasa del 50 % hasta alcanzar la capa calcarenítica situada a 103 m. Este nivel resulta mucho menos competente, con RQD medios de 70-80 % y con un grado de meteorización de I, que contrasta con el grado medio de GM II-III o incluso GM-IV del resto del sondeo.

Bajo el nivel calcarenítico los materiales argilíticos presentan un estado parecido al de los materiales superiores con RQD por debajo de 50 que pasa a ser 0 % en la práctica totalidad de las maniobras realizadas hasta el final del sondeo, situado a 231 m.

Se observan numerosos planos de discontinuidad lisos y brillantes. El buzamiento general de la unidad es de unos 30°.

A los 196 m de profundidad, en el contacto entre las dos unidades atravesadas se localizó una bolsa de gas que produjo emanación continua durante unas 12 horas. Una visión de este suceso se refleja en la Figura 3-22.

En este sondeo se realizaron ensayos de permeabilidad recogidos en el apartado 3.3. El nivel piezométrico en este sondeo se situó en torno a los 2 m de profundidad.



Figura 3-21. Aspecto de la Unidad de Bolonia en el S-3. Caja 8 entre 52 y 60 m. (SECEG, 1983b).





Figura 3-22. Emanación de gas en el sondeo S-3 (SECEG, 1983b).

#### 3.2.1.4 Sondeo S-4

Este sondeo se realizó en su totalidad en rocas pertenecientes a la Unidad de Almarchal.

Los testigos del sondeo presentaron una composición homogénea de argilitas grises con algunas zonas marrones, intensamente microfisuradas y replegadas (Figura 3-23). Se observaron algunas intercalaciones calcáreas de escaso espesor.

La fracturación del macizo es elevada, con valores de RQD de 0 % hasta los 88 m, a partir de donde aumenta hasta valores medios de 40 o 50 %. La mayor parte de los planos de discontinuidad descritos son irregulares, rugosos y suaves.

La alteración de los materiales se sitúa durante todo el sondeo entre GM-III y GM-II con algunos niveles algo más alterados de GM-IV y escasas zonas con GM-V.

En este sondeo se realizaron ensayos de permeabilidad recogidos en el apartado 3.3. El nivel piezométrico en este sondeo se situó en torno a los 2-4 m de profundidad.



Figura 3-23. Aspecto de la Unidad de Almarchal en el S-4. Caja 4 aprox. 20 m. (SECEG, 1983b).

### 3.2.1.5 Sondeo S-5

Este sondeo se realizó en parte con tricono sin recuperación de testigo. El empleo de este útil se permitió en las zonas de menor interés (como la zona alterada superficial) o en zonas muy homogéneas.

Los materiales atravesados pertenecen a la Unidad de Algeciras, concretamente a la serie de Flysch margo-arenisco-micáceo. Estos materiales están compuestos por margas, margas limosas y limolitas con intercalaciones de areniscas micáceas de importante espesor (Figura 3-8). Geotécnicamente hablando, estas intercalaciones presentan una mayor calidad que el resto del macizo rocoso, en contraposición a los niveles más margosos que presentan importante microfisuración y alteración.

La serie aparece en disposición normal hasta los 300 m donde aparece invertida.

El grado de fracturación es variable con RQD de 0 a 100 %, siendo los más altos los correspondientes a las zonas de areniscas. La mayor parte de la fracturación corresponde con planos de estratificación, que generalmente presentan buzamientos variables entre 20 y 60° y superficies planas, lisas y más o menos suaves.

El grado de alteración es en general bajo (GM-I o II) con zonas de GM-III o incluso GM-IV principalmente asociadas a margas.

El nivel piezométrico en este sondeo se situó en torno a los 4 m de profundidad. En el estudio de la recuperación del mismo se estimaron transmisividades de 1 a  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{min}$ .



Figura 3-24. Aspecto de la Unidad de Algeciras en el S-5. Caja 13 aprox. 75 m. (SECEG, 1983b).

### 3.2.1.6 Sondeo S-7

Este sondeo se realizó sobre materiales de la Unidad de Almarchal. Estos son principalmente argilitas grises y verdosas muy microfisuradas y replegadas con un grado variable de alteración entre las que se intercalan finas capas de calizas y calcarenitas de manera muy esporádica (Figura 3-25).

El grado de fracturación de todo el macizo rocoso es muy alto, con RQD prácticamente de 0 % en todo el sondeo con pequeñas excepciones coincidente con intercalaciones areniscosas. Los planos de discontinuidad más claros corresponden con la estratificación, normalmente lisa y

suave-brillante con un buzamiento de en torno a los 45°. El grado de alteración general se encuentra en torno a GM II-III, con zonas de GM IV.

El nivel piezométrico en este sondeo se situó en torno a los 12 m de profundidad. En este sondeo se realizaron varios ensayos presiométricos que se recogen en el apartado 3.3.



Figura 3-25. Aspecto de la Unidad de Almarchal en el S-7. Caja 14 aprox. 90 m (SECEG, 1983b).

#### 3.2.1.7 Sondeo S-9

Este sondeo se realizó sobre materiales de la Unidad de Almarchal o de transición entre esta y la Unidad de Bolonia. Los materiales, muy homogéneos, estaban compuestos por argilitas grises muy fisuradas y alteradas con finas intercalaciones calcareníticas muy dispersas (Figura 3-26).

El grado de fracturación de todo el macizo es muy alto, con RQD de 0 % en todo el sondeo. La mayor parte de los planos descritos son lisos y brillantes. Se exceptúa aquí el tramo correspondiente a los últimos 3 m del sondeo donde la fracturación era menor, con RQD en torno a 50 %. El grado de alteración disminuye en profundidad desde un suelo residual (GM-VI) en superficie hasta un GM-II en los últimos 3 m.

El nivel piezométrico en este sondeo se situó en torno a los 4 m de profundidad. En este sondeo se realizaron varios ensayos presiométricos que se recogen en el apartado 3.3.



Figura 3-26. Aspecto de la Unidad de Almarchal en el S-9. Caja 9 aprox. 40 m (SECEG, 1983b).

### 3.2.2 1ª Campaña Marruecos (1983)

Esta campaña se realizó en paralelo a la campaña de sondeos “Campaña 1982-1983” ejecutada en la orilla española del Estrecho (Figura 3-27). En total se perforaron 935 m (Tabla 3-3).

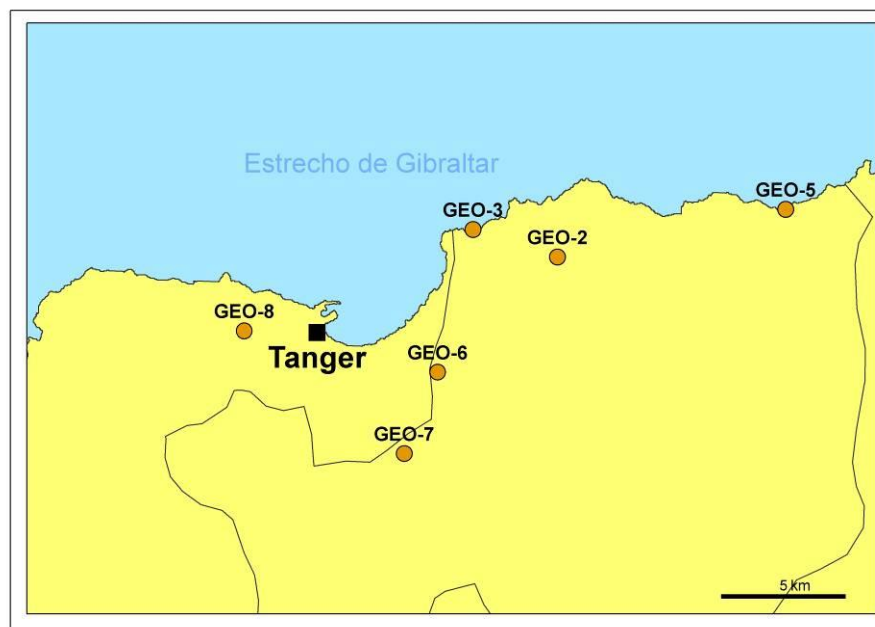


Figura 3-27. Situación de los sondeos de la primera campaña en Marruecos (1983)

Tabla 3-3. 1º Campaña de sondeos en tierra de Marruecos.

Sondeo	Unidad	Perforación (m)	UTM	
			x	y
GEO-2	Bolonia	119,5	256.123	3.966.280
GEO-3	Algeciras	290,1	252.710	3.967.385
GEO-5	Algeciras	120,0	265.371	3.968.202
GEO-6	Facinas	184,0	251.280	3.961.624
GEO-7	Facinas	85,4	249.926	3.958.333
GEO-8	Facinas	136,6	243.448	3.963.294

### 3.2.3 2ª Campaña Marruecos (1992)

En esta campaña, ejecutada en 1992, se realizaron 10 sondeos con recuperación de testigo (Tabla 3-4).

Tabla 3-4. 2ª Campaña de sondeos en tierra de Marruecos

Sondeo	Unidad	Perforación (m)
SB-1	Algeciras	118,2
SB-2	Algeciras	165,0
SB-3	Algeciras	165,0
SB-4	Algeciras	153
SB-5	Algeciras	200,4
SB-6	Algeciras	180,4

Sondeo	Unidad	Perforación (m)
SB-7	Algeciras	107,0
SB-8	Algeciras	50,8
SB-9	Algeciras	30,0
SB-10	Algeciras	40,0

### 3.2.4 Campaña Sea Nautilus (1991)

En esta campaña se utilizó una sonda perforadora sumergible con una capacidad máxima de perforación de 5 m con recuperación de testigo.

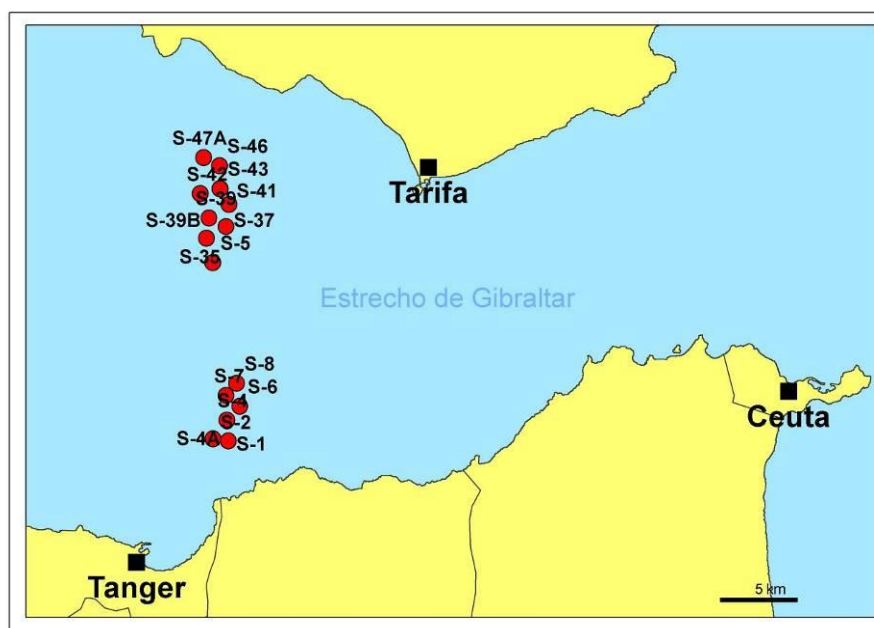


Figura 3-28. Situación de los sondeos de la campaña Sea Nautilus (1991)

En el conjunto de la campaña se realizaron 22 sondeos cortos (Figura 3-28 y Tabla 3-5) con una longitud total de 57 m con una recuperación media del 29 % lo que hace un total de 16 m de testigo (SECEG, 1991; SNED, 1991a, 1991b; SECEG, 1994c).

Tabla 3-5. Campaña de sondeos submarinos Sea Nautilus-1991.

Sondeo	Perforación (m)	Recuperación (%)	UTM		
			x	y	z
S-1	1,00	10	252.413	3.971.134	- 46
S-1A	3,90	38	252.413	3.971.134	- 46
S-2	5,17	67	251.392	3.971.274	- 51
S-4	1,40	28	252.300	3.972.488	- 51
S-4A	4,00	24	252.300	3.972.488	- 52
S-5	3,58	46	251.373	3.982.737	- 65
S-6	2,60	4	253.154	3.973.390	- 68
S-6A	1,24	48	253.154	3.973.390	- 68
S-7	1,00	15	252.254	3.974.081	- 84
S-7A	> 2,00	35	252.254	3.974.081	- 84
S-8	3,72	32	252.938	3.974.874	- 137
S-35	0,80	13	250.978	3.984.333	- 145
S-35B	0,75	46	250.978	3.984.333	- 145



Sondeo	Perforación (m)	Recuperación (%)	UTM		
			x	y	z
S-37	2,20	18	252.247	3.985.075	- 155
S-39	1,42	28	251.138	3.985.649	- 125
S-39B	1,64	63	251.135	3.985.654	- 128
S-41	2,18	30	252.439	3.986.531	- 75
S-42	4,00	25	250.562	3.987.229	- 80
S-43	1,40	28	251.856	3.987.554	- 125
S-43A	2,40	20	251.851	3.987.547	- 124
S-46	2,42	18	251.821	3.989.042	- 55
S-47A	4,00	5	250.778	3.989.586	- 40

Dada la escasa longitud de las perforaciones, los datos geológicos obtenidos son algo escasos si bien, permiten conocer los materiales que conforman la zona más superficial del fondo del Estrecho.

De manera general, con algunas diferencias entre una localización y otra, se puede describir el fondo marino con los siguientes materiales:

- Un depósito superficial de materiales arenosos bioclásticos sueltos. Este depósito presenta un espesor variable de hasta 3 m de espesor, si bien no siempre está presente.
- Una costra calcárea principalmente bioclástica con presencia de litoclastos terciarios proveniente de las unidades de flysch infrayacentes. Presenta, de manera general, una elevada cementación.
- Un sustrato principalmente arcilloso correspondiente a series basales de las diferentes unidades tipo flysch de Algeciras o Bolonia.

En la Figura 3-29 se muestran, de manera esquemática, las columnas de los diferentes sondeos realizados en esta campaña y el sondeo realizado en la campaña Pholas-92 (véase apartado 3.2.5).

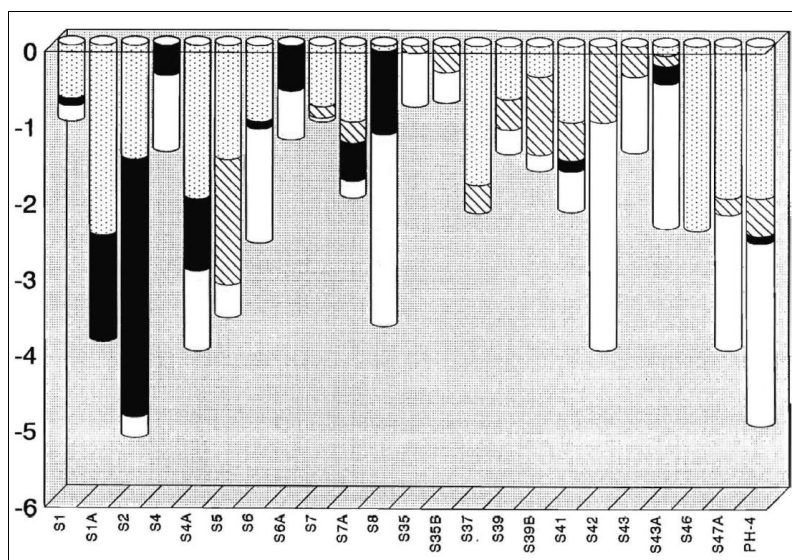


Figura 3-29. Columnas simplificadas de los sondeos de las campañas Sea Nautilus-91 y Pholas-92 (SECEG, 1994c).

### 3.2.5 Campaña Pholas (1992)

Esta campaña se desarrolló en el mes de mayo de 1992 en una zona con 301 m de columna de agua, en la zona más profunda del Umbral de Camarinal. El objetivo principal fue comprobar la factibilidad para ejecutar sondeos marinos profundos con sistemas de perforación tradicionales desde buques geotécnicos de posicionamiento dinámico, analizando la capacidad de mantenimiento en posición del barco ante las fuertes corrientes marinas y la influencia de las mismas sobre el varillaje de perforación.

En esta campaña se realizó un único sondeo (PH-4) de 5 m (Figura 3-30 y Tabla 3-6) con una recuperación de solamente 53 cm de testigo (SNED, 1992), teniendo que abandonarse la campaña por las fuertes corrientes que afectaban al varillaje de perforación.

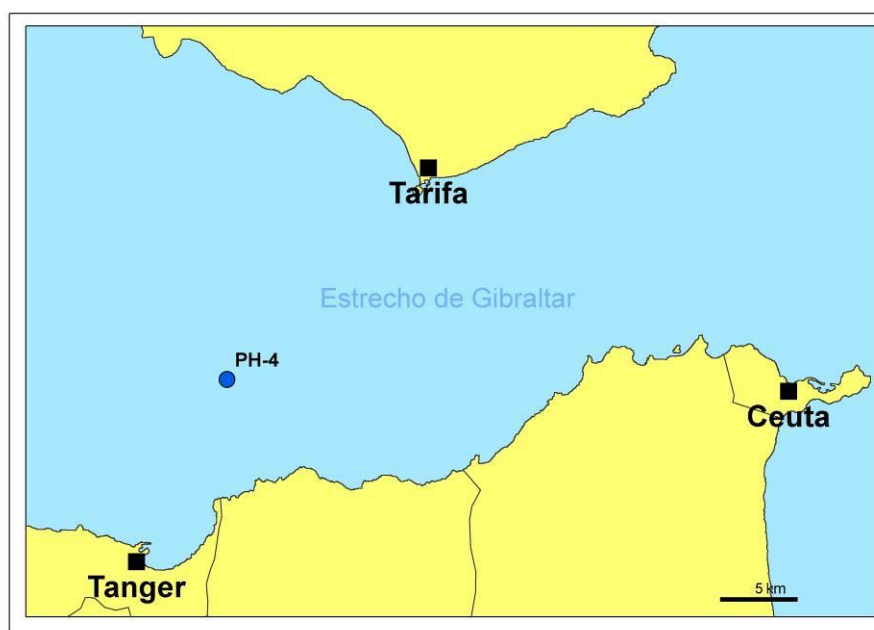


Figura 3-30. Situación de los sondeos de la campaña Pholas (1992)

La litología observada en el testigo del sondeo PH-4 constaba de fragmentos de calcarenita gris-verdosa, de grano fino, masiva y con venas de calcita y algunos restos de arcillas calcáreas grises, que podían corresponder a una serie de flysch, con fragmentos de calcarenitas de grano grueso intercalados (SECEG, 1992). Con posterioridad el flysch se atribuyó a una sucesión basal cretácica de la Unidad de Algeciras o Bolonia (SECEG, 1994c).

Si bien, la perforación no fue exitosa, se pudo comprobar la utilidad de los buques de posicionamiento dinámico para la realización de sondeos profundos en el área de estudio.

Tabla 3-6. Campaña de sondeos submarinos Pholas-1992

Sondeo	Perforación (m)	Recuperación (m)	UTM		
			x	y	z
PH-4	5	0,53	252.315	3.975.130	-192

### 3.2.6 Campaña Kommandor Therese (1994)

Esta campaña se realizó en marzo 1994 con la colaboración del *British Geological Survey*. Para su realización se utilizó una sonda perforadora autónoma que permitía un máximo de 5 m de sondeo con recuperación de testigo continuo. Se planteó como una continuación de la primera campaña de sondeos marinos cortos realizada en 1991 (véase apartado 3.2.4).

Se realizaron 67 sondeos cortos en 31 emplazamientos (Figura 3-31 y Tabla 3-7), con un total de 116,85 m, de los que se recuperaron un total de 33,52 m (29 %) (SECEG, 1994a, 1994b).

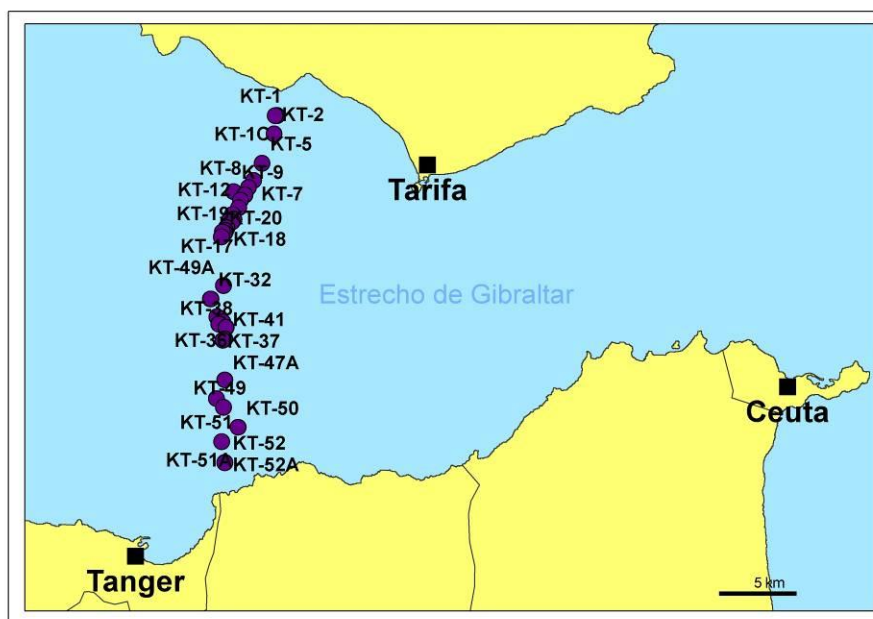


Figura 3-31. Situación de los sondeos de la Kommandor Therese (1994)

Tabla 3-7. Campaña de sondeos submarinos Kommander Therese-1994 (Skinner y Gillespie, 1994).

Sondeo	Perforación (m)	Recuperación (m)	UTM		
			x	y	z
KT-1	1,05	0,26	255.634	3.992.188	-28
KT-1A	0,80	0,30	255.639	3.992.175	-28
KT-1B	0,50	0,25	255.636	3.992.185	-28
KT-1C	1,28	0	255.535	3.992.180	-28
KT-2	3,02	1,53	255.463	3.990.978	-24
KT-5	1,90	0,65	254.686	3.989.049	-28
KT-7	0,85	0,25	254.113	3.987.924	-21
KT-7A	0,76	0	254.117	3.987.929	-21
KT-8	0,56	0	253.785	3.987.458	-40
KT-8A	0,25	0,55	253.789	3.987.466	-40
KT-9	2,05	0,69	252.822	3.987.182	-50
KT-10	0,43	0	253.561	3.986.966	-52
KT-10A	1,16	0,15	253.528	3.986.965	-52
KT-10B	0,93	0	253.533	3.986.961	-52
KT-11	2,09	1,56	253.261	3.986.627	-81
KT-12	3,56	2,70	253.144	3.956.123	-75
KT-13	2,42	1,15	252.723	3.985.625	-90
KT-14	3,65	2,10	252.738	3.985.686	-125
KT-15	3,73	0	252.806	3.985.369	-160
KT-15A	4,92	0	252.802	3.985.371	-160
KT-15b	0,89	0,35	252.842	3.985.349	-160



Sondeo	Perforación (m)	Recuperación (m)	UTM		
			x	y	z
KT-16	1,49	0,43	252.496	3.985.243	-115
KT-16A	1,37	0,62	252.508	3.985.245	-115
KT-58	0,58	0	252.709	3.985.201	-132
KT-58A	0,67	0,1	252.703	3.985.202	-132
KT-17	1,37	0,32	252.362	3.984.815	-177
KT-17A	0,17	0	252.345	3.984.822	-177
KT-17b	1,88	0,48	252.373	3.984.802	-177
KT-18	0,38	0	252.269	3.984.635	-144
KT-18A	0,29	0	252.277	3.984.638	-144
KT-18B	0,17	0	252.275	3.984.621	-144
KT-18C	0,37	0	252.278	3.984.602	-144
KT-18C'	2,65	0,40	252.270	3.984.640	-144
KT-19	0,81	0,08	252.230	3.984.476	-161
KT-19'	0,60	0,03	252.227	3.984.478	-161
KT-19A	0,77	0,10	252.228	3.984.473	-161
KT-19B	0,60	0,30	252.226	3.984.478	-161
KT-57A	2,00	0,33	252.078	3.984.539	-154
KT-20	1,67	0,35	252.009	3.984.202	-187
KT-32	1,44	0,62	251.289	3.980.124	-156
KT-32A	1,30	0	251.330	3.980.122	-156
KT-32B	2,82	1,21	251.318	3.980.121	-156
KT-32C	1,59	0,30	251.319	3.980.121	-156
KT-35	1,49	0,38	251.725	3.978.945	-255
KT-35A	2,63	0,83	251.720	3.978.961	-255
KT-36	2,32	0,68	252.122	3.978.624	-265
KT-37	1,05	0	251.880	3.978.499	-278
KT-37A	1,19	0,27	251.855	3.978.487	-278
KT-37B	0,87	0	251.874	3.978.497	-278
KT-37C	1,10	0,20	251.850	3.978.486	-278
KT-38	1,94	0,42	252.322	3.978.252	-255
KT-38A	1,20	0,20	252.330	3.978.259	-255
KT-38B	3,42	1,58	252.317	3.978.263	-255
KT-41	1,33	0,16	252.235	3.977.500	-302
KT-41A	1,46	0,45	252.221	3.977.502	-302
KT-41B	0,40	0	252.107	3.977.429	-302
KT-47A	3,78	1,45	252.230	3.974.797	-156
KT-48	0,92	0,15	251.695	3.973.570	-71
KT-48A	5,12	2,92	251.690	3.973.571	-71
KT-49	3,49	0,26	252.151	3.973.010	-57
KT-49A	3,50	0,44	252.148	3.981.008	-57
KT-49B	3,73	0,50	252.151	3.973.012	-57
KT-50	1,75	0,60	253.110	3.971.685	-32
KT-51	0,65	0,03	252.034	3.970.752	-45
KT-51A	4,48	1,72	252.036	3.970.752	-45
KT-52	2,72	0,45	252.237	3.969.378	-31
KT-52A	3,33	1,67	252.232	3.969.373	-31

Los materiales perforados son los siguientes (SECEG, 1994a):

- Plataforma española:

En el KT-1 y KT-2 se perforó la Unidad de Almarchal. Siguiendo más al sur, materiales de edad Eoceno superior-Oligoceno pertenecientes a series basales de unidades sin determinar. Al sur del KT-5 se recuperaron materiales de las unidades Algeciras o Bolonia.

A parte de esto, el sondeo KT-12 perforó una lumaquela pliocuaternaria. Desde el KT-15 hacia el sur los materiales descritos fueron conglomerados litobioclásticos más o menos cementados.

- Zona de umbral:

Los materiales descritos en esta zona fueron, conglomerados bioclásticos en la zona del monte Tartesos y conglomerados bioclásticos coralinos en la zona de meseta.

- Plataforma marroquí:

En esta zona del Estrecho se perforaron materiales tipo flysch principalmente arcillosos, con intercalaciones calcareníticas de unidades no determinadas (Cretácico superior-Oligoceno). En el KT-50 se han descrito materiales pertenecientes a las unidades de Algeciras o Bolonia.

### 3.2.7 **Campaña Bavenit (1995)**

Esta campaña, ejecutada con posterioridad al test realizado en la campaña Pholas-1992, tenía como objetivo la realización de ocho sondeos en las zonas profundas del umbral de Camarinal, en el área comprendida entre el Monte Tartesos y el talud de la plataforma continental marroquí.

Durante la campaña se probaron dos sistemas de perforación diferentes. El primero con perforación mediante turborotación y varillaje de aluminio y el segundo con baterías tradicionales y varillaje de acero. Las condiciones hidrodinámicas del Estrecho no permitieron la correcta perforación con ninguno de los dos sistemas.

A lo largo de la campaña se realizaron un total de 25 sondeos (Figura 3-32 y Tabla 3-8) con muy escasa penetración (< 8 m) y muy bajas recuperaciones (42 % de los tramos realizados con sonda testiguera). Esto hizo que los datos geológicos recopilados fueran menos relevantes de lo esperado.

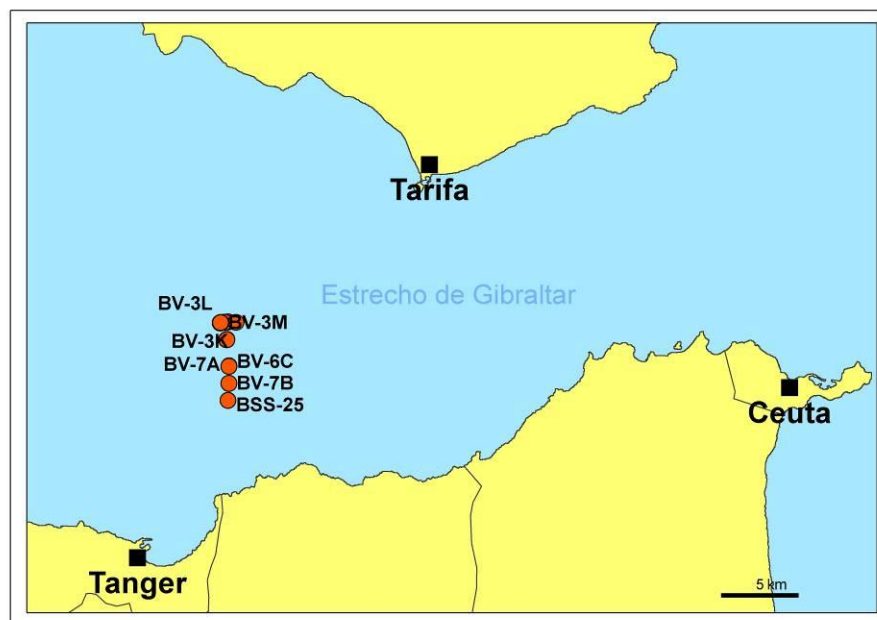


Figura 3-32. Situación de los sondeos de la campaña Bavenit (1995)

Tabla 3-8. Campaña de sondeos submarinos Bavenit (1995) (SECEG, 1995)

Sondeo	Perforación (m)	Recuperación (m)	RQD (%)	x	UTM y	z
BV-1A	3,7	0,39	0	252.227	3.977.497	-300
BV-1B	5,0	0,91	0	252.223	3.977.496	-300
BV-1C	3,5	3,06	0	252.231	3.977.494	-300
BV-1D	2,0	0,53	0	252.244	3.977.505	-300
BV-1E	2,0	-	-	252.232	3.977.497	-300
BV-3A	3,8	0,79	40	252.328	3.978.645	-263
BV-3B	4,5	-	-	252.103	3.978.641	-263
BV-3V	4,0	-	-	252.839	3.978.611	-263
BV-3D	1,3	0,80	0	251.850	3.978.597	-263
BV-3E	2,0	1,30	7,6	251.850	3.978.599	-263
BV-3F	3,8	1,60	20	251.851	3.978.598	-263
BV-3G	0,8	0,65	0	251.815	3.978.605	-263
BV-3H	2,5	-	-	251.844	3.978.624	-263
BV-3I	4,0	-	-	251.849	3.978.603	-263
BV-3J	5,0	-	-	251.837	3.978.598	-263
BV-3K	3,0	0,95	0	251.803	3.978.592	-272
BV-3K1	2,8	2,80	0	251.803	3.978.592	-272
BV-3L	1,8	0	0	251.839	3.978.600	-272
BV-3M	4,6	0	0	251.826	3.978.600	-272
BV-6A	7,6	-	-	252.397	3.975.752	-264
BV-6B	6,0	-	-	252.391	3.975.776	-264
BV-6C	4,0	0,97	0	252.380	3.975.750	-264
BV-7A	4	2	0	252.373	3.974.626	-127
BV-7B	8	-	-	252.375	3.974.630	-127
BSS-25	5	5	0	252.329	3.973.519	-70

Los materiales perforados son los siguientes (SECEG, 1995):

- Emplazamiento 1 (sondeos BV-1):

En esta zona de perforación se cortaron, baja una costra calcárea decimétrica, margas gris azuladas con niveles calcareníticos y de calizas micríticas, de edad Oligoceno medio-superior pertenecientes a las unidades de Algeciras o Bolonia.

- Emplazamiento 3 (sondeos BV-3):

En esta zona se perforó únicamente una costra calcárea coralina y conglomerados bioclásticos más o menos cementados con una estructura tabular.

- Emplazamiento 6 (sondeos BV-6):

De los tres sondeos ejecutados en esta zona, solamente se pudo recuperar 1 m de testigo. Los materiales observados pertenecían a una costra superior bajo la que aparecían bloques calcareníticos con arcillas rojizas y marrones. Estos materiales se situaron en la sucesión basal (Paleoceno-Eoceno) de una unidad no determinada.

- Emplazamiento 7 (sondeos BV-7):

Los materiales perforados se componían de arcillas grises con margas del Oligoceno medio-superior pertenecientes a la sucesión de flysch margo-areniscoso-micáceo de la Unidad de Algeciras o Bolonia.

- BSS-25:

Este sondeo, realizado en aguas someras (75 m) de la plataforma marroquí recuperó 5 m de margas gris-verdosas con diferentes grados de meteorización pertenecientes a la sucesión basal de una unidad no determinada.

### 3.2.8 Campaña Bucentaur (1997)

Esta campaña se desarrolló entre febrero y abril de 1997.

De la campaña prevista en origen solamente se pudieron investigar cinco localizaciones, realizándose un total de 11 sondeos (Figura 3-33 y Tabla 3-9). Solamente dos perforaciones alcanzaron la profundidad prevista ya que, al igual que en las anteriores campañas de perforación en el mar, se encontraron muchas dificultades debidas a las fuertes corrientes presentes en el Estrecho (SECEG, 1997a).



Figura 3-33. Situación de la sondeos de la campaña Bucentaur (1997)

Tabla 3-9. Campaña de sondeos submarinos Bucentaur-1997.

Sondeo	Zona	Perforación (m)	Recuperación (m)	x	UTM y	z
BU-2	Canal Norte	6,35	0,20	251.245	3.980.896	-275
BU-2A		42,79	23,32	251.264	3.980.895	-276
BU-2B		15,48	6,80	251.071	3.981.149	-292
BU-2C		21,24	7,72	250.921	3.981.335	-300
BU-3	Meseta	3,41	2,37	251.815	3.978.614	-267
BU-3A		2,54	0,99	251.831	3.978.599	-273
BU-3B		10,27	8,55	251.834	3.978.599	-276
BU-3C		118,59	104,38	251.834	3.978.603	-275
BU-4	M. Tartesos	14,41	7,58	251.306	3.980.234	-257
BU-5	Helio	4,28	3,28	251.946	3.983.999	-219
BU-5A		105,0	102,9	251.941	3.983.997	-221

En esta campaña se desveló la existencia de dos paleocanales, transversales a la traza del túnel, rellenos por importantes depósitos constituidos por brechas cuaternarias. Estas brechas fueron descritas de la siguiente manera:

“Brechas arcillosas de flysch: están constituidas por clastos de flyschs, fundamentalmente arcillosos, con heterometría alta. Observadas a la lupa binocular con más de 10 aumentos se reconocen fragmentos milimétricos de restos fósiles alterados a calcita blanca pulverulenta de corales, balanos, foraminíferos o conchas de indudable edad cuaternaria. Localmente contienen niveles de arenas de cuarzo muy lavadas, igualmente recientes. Esta brecha se interpreta como un desprendimiento submarino de ladera, en el que la masa se desliza súbitamente, mientras que los bloques arcillosos se fragmentan durante el proceso, pero apenas se mezclan con los sedimentos recientes. El deslizamiento pudo generarse simplemente por la inestabilidad de la ladera dentro del proceso evolutivo de erosión submarina, o inducida por un evento sísmico. La brecha está muy compactada y, por su aspecto general, resultaría difícil de diferenciar de una brecha tectónica, si no fuese por criterios faunísticos o por su posición estratigráfica” (SECEG, 1997b).

Los materiales perforados son los siguientes (SECEG, 1997b; SNED, 1997):

- Emplazamiento BU-2 (canal norte):

El sondeo más largo perforado en esta zona fue el BU-2A. La litología de los cuatro sondeos fue semejante.

Una capa superior con espesores muy variados, desde 0 (BU-2B y 2C) hasta 24,5 m (BU-2A), compuesta por una caliza bioclástica coralina bien cementada, con huecos deposicionales que le confieren gran permeabilidad. Los valores de RQD medidos superan el 75 %.

Una capa intermedia (aflorante en los sondeos B y C) compuesta por un conglomerado bioclástico con gravas flyschoides.

Un material inferior, a cuya base no se ha llegado, compuesto por brechas cuaternarias heterométricas. Los cantos, con diferentes grados de redondez, están compuestos por calcarenitas y argilitas versicolores procedentes de alguna de las sucesiones basales de las unidades de flysch.

- Emplazamiento BU-3 (meseta):

En este emplazamiento se encontraron materiales muy similares a los del emplazamiento del BU-2.

Una capa superior de calizas biohémicas. Bajo ésta se cortó un conglomerado bioclástico compuesto por restos coralinos y gravas con origen en las formaciones tipo flysch que pasó, a los 29 m, a unas gravas bioclásticas con muy escasa cementación.

A partir de los 74,4 m (BU-3C) se cortaron las brechas cuaternarias sin poder llegarse a la base de las mismas al final del sondeo (118,5 m).

Entre 83 y 102 m se vuelven a encontrar las gravas bioclásticas sin que se tenga muy claro el origen deposicional de este tramo.

- Emplazamiento BU-4 (monte Tartesos):

El sondeo realizado en esta zona, muy cercana a la cumbre del monte Tartesos, cortó una capa superior de calizas biohémicas algo más fracturadas que en otras localizaciones. Bajo esta se encontró un conglomerado semejante al encontrado en los otros emplazamientos. El sustrato se

alcanzó a los 7,50 m. Estaba compuesto por areniscas cuarcíticas de grano fino, con buzamientos de entre 20 y 30°, pertenecientes a la Unidad de Algeciras. El RQD es bajo, en todo momento inferior a 50 %.

- Emplazamiento BU-5 (Helio):

El sondeo BU-5A que alcanzó los 105 m cortó, bajo 3 m de conglomerado bioclástico, unas argilitas grises, con algún banco de arenisca calcárea muy laminada y buzamientos de entre 20 y 30°, pertenecientes a la Unidad de Algeciras. La fracturación en estos materiales es escasa con valores del RQD altos, generalmente entre 70 y 80 %, siendo, en la práctica totalidad del sondeo mayor a 50 %.

### 3.2.9 Campaña Norskald (1998-99)

Esta campaña se realizó entre noviembre de 1998 y mayo de 1999. El barco utilizado fue el mismo de la campaña Pholas-95, rebautizada como Norskald.

En esta campaña se utilizó una nueva versión de carenas hidrodinámicas anticorriente para la tubería de perforación lo que mejoró sensiblemente la operabilidad en zonas de corriente. En total se ejecutaron 11 sondeos (incluyendo cinco redundantes), con un total de 1040 m perforación (Figura 3-34 y Tabla 3-10), en seis emplazamientos diferentes (SECEG, 1999a).

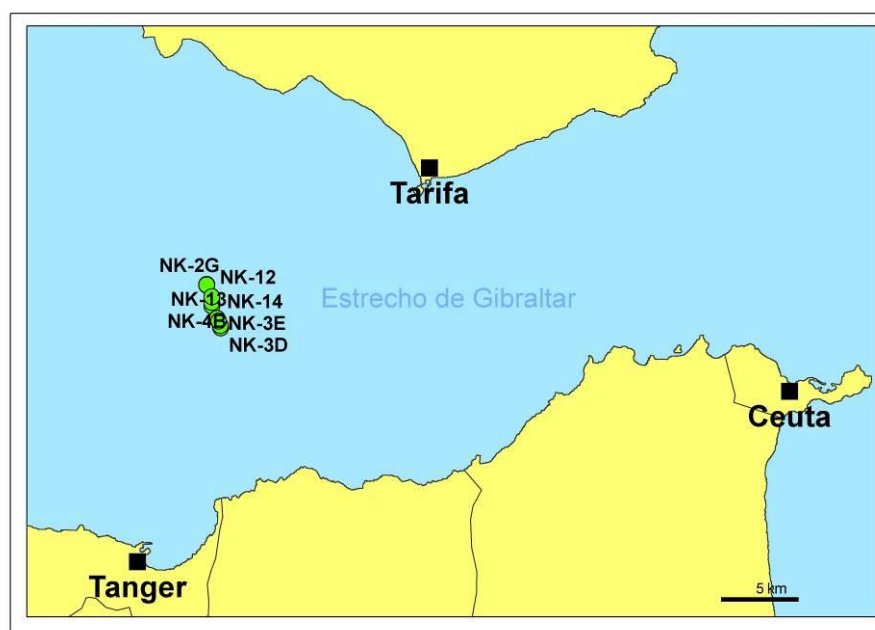


Figura 3-34. Situación de los sondeos de la Campaña Norskald (1998-99)

Tabla 3-10. Campaña de sondeos submarinos Norskald (1998-99).

Sondeo	Zona	Perforación (m)	Recuperación (%)	x	UTM y	z
NK-2D	Canal norte	25,20	-	250.921	3.981.342	-300
NK-2E		26,00	-	250.920	3.981.336	-300
NK-2F		50,77	54	250.921	3.981.293	-300
NK-2G		216,18	92	250.925	3.981.307	-300

NK-3D	Meseta	160,42	95	251.847	3.978.491	-280
NK-3E		216,35	99	251.806	3.978.656	-280
NK-4A	Tartesos	16,00	-	251.256	3.979.941	-176
NK-4B		31,68	76	251.257	3.980.142	-176
NK-12	Tartesos N	222,56	96	251.253	3.980.540	-235
NK-13	Tartesos S	19,90	63	251.607	3.979.106	-266
NK-14	Meseta N	54,98	77	251.710	3.978.937	-256

Los materiales perforados son los siguientes (SECEG, 1999b):

- Emplazamiento NK-2 (Canal norte):

El objetivo de los sondeos de este emplazamiento era conocer el espesor de las brechas cuaternarias descritas en la campaña Bucentaur-97 (véase apartado 3.2.8), si bien, la base de éstas no pudo ser alcanzada por el sondeo más profundo (216,18 m).

Los primeros metros de los sondeos se realizaron a destroza por lo que no se pudo caracterizar totalmente esos materiales.

Las brechas, con carácter general, presentan una estructura caótica, con granulometría heterogénea (hasta bloques métricos), composición heterogénea y bloques con diferentes grados de redondeo. La matriz es arcillosa con niveles blandos.

Dentro de las brechas se describen algunos planos de fractura con inclinaciones de 50-60°.

- Emplazamiento NK-3 (Meseta):

Este emplazamiento se corresponde con el emplazamiento 3 de la campaña Bucentaur-97 (véase apartado 3.2.8). Debido a esto se decidió realizar los primeros metros de sondeo sin recuperación de testigo y apoyarse en las testificaciones de esa campaña para completar la caracterización.

Los dos sondeos realizados alcanzaron profundidades de 160 y 216 m.

En ambos casos se atravesó, en los metros realizados con recuperación de testigo, una brecha cuaternaria.

En el NK-3D, la brecha era gris y arcillosa con bloques de hasta 40 cm angulosos a subangulos heterométricos. Se observó la presencia de algún bloque disperso de calcarenitas grises. Si bien, de manera general, la estructura era caótica y se reconocieron algunos niveles imbricados.

En el NK-3E, la brecha era rojiza y arcillosa muy heterométrica. Los bloques eran principalmente de pelita roja y en menor medida de argilita gris. El tamaño de los bloques superaba en algunos casos los 60 cm, existiendo todos los tamaños inferiores hasta la matriz. Algún bloque disperso de calcarenita podía superar los 2 m de longitud. Al igual que en el material descrito en el sondeo anterior, aparecieron algunos tramos con estructura imbricada incipiente.

- Emplazamiento NK-4 (Tartesos):

Este emplazamiento coincide con el del sondeo BU-4 de la campaña Bucentaur-97 (véase apartado 3.2.8).

Los materiales perforados (hasta 31 m) se corresponden a series basales de las unidades de Algeciras o Bolonia. Se trata de argilitas grises con pasadas de margas y pelitas marrón-rojizas e intercalaciones de calcarenita gris laminada. En el sondeo NK-2B, la serie parece estar invertida y buzando entre 50 y 60°. El RQD es variable, manteniéndose en torno al 50 %.

- Emplazamiento NK-12 (Tartesos norte):

En esta zona se realizó un sondeo de 222,5 m de profundidad. Este sondeo cortó dos materiales diferenciados.

Hasta los 26,5 m de profundidad se perforó una costra calcárea coralina compuesta por cantos bioclásticos con presencia de litoclastos de flysch y cuarzo. Su matriz era arenosa y bioclástica principalmente. Se observaba una elevada porosidad móldica y deposicional. La fracturación observada era escasa con valores de RQD que normalmente superaban el 75 %.

A partir de esta cota y hasta el final del sondeo se cortó una sucesión de pelitas rojas propias de las sucesiones basales de las unidades de Algeciras o Bolonia. El contacto observado era neto y limpio. Esta sucesión presentaba una alternancia de pelitas rojas y grises con niveles de areniscas finas. La serie presentaba un buzamiento invertido de unos 50 a 70°. Los primeros metros atravesados presentaban algo de alteración si bien, el conjunto presentaba un aspecto fresco y una fracturación muy escasa con valores de RQD superiores al 75 % en la mayoría de los casos.

Este sondeo sirvió para despejar las dudas sobre la naturaleza del monte Tartesos y clarificar su origen como un afloramiento del sustrato flyschoides.

- Emplazamiento NK-13 (Tartesos sur):

Este emplazamiento se situó entre el 3 y el 4 a fin de acotar lo máximo posible la extensión de las brechas cuaternarias.

El sondeo realizado aquí (NK-13) cortó un nivel superior de calizas biohémicas (hasta los 7,3 m), bajo el que se observó una sucesión de pelitas gris azuladas correspondientes a la serie basal de las unidades Algeciras o Bolonia.

- Emplazamiento NK-14 (Meseta norte):

En este emplazamiento, situado en el borde del canal sur, se encuentran todas las litologías presentes en esta zona a pesar de la escasa profundidad alcanzada (54,95 m):

Hasta 10 m se describe la caliza coralina.

De 10 a 25 m aparece un conglomerado bioclástico heterométrico con matriz arenosa bioclástica. El grado de cementación disminuye hacia la base pasando a una arena.

De 25 a 40 m el conglomerado pasa a ser una arena bioclástica gruesa con algún litoclasto muy redondeado de origen en los flysch de la zona.

De 40 a 49,50 m se localiza la brecha arcillosa marrón rojiza que presenta una base erosiva.

A partir de 49,50 m se pasa, de manera neta, a una argilita gris azulada correspondiente a la serie basal de una unidad flysch (Algeciras o Bolonia).



### 3.2.10 Campaña Kingfisher (2005)

En esta campaña se realizaron 18 sondeos (Figura 3-35 y Tabla 3-11) en 14 emplazamientos repartidos a lo largo de la traza del futuro túnel (SEACORE, 2005). En el total de la campaña se perforaron 1531 m, de los cuales 728 m se realizaron con recuperación de testigo.

Los metros en los que se recuperó el testigo se perforaron con una sonda *Wire-Line* de diámetro HQ.

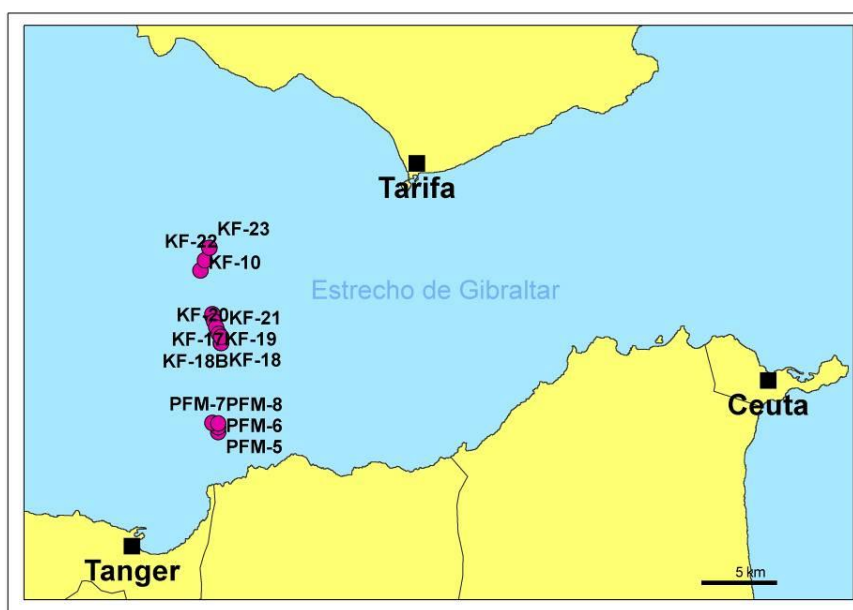


Figura 3-35. Situación de los sondeos de la campaña Kingfisher (2005)

Tabla 3-11. Campaña de sondeos submarinos Kingfisher (2005).

Sondeo	Perforación (m)	Recuperación (m)	UTM		
			x	y	z
KF-3G	96,72	5,40	251.815	3.978.637	-282
KF-3H	225,67	19,62	251.813	3.978.616	-274
KF-3I	324,94	81,01	251.788	3.978.650	-276
KF-10	27,66	22,56	250.979	3.981.746	-306
KF-16	117,02	59,46	251.785	3.978.800	-266
KF-17	107,00	-	251.912	3.978.333	-274
KF-18	22,15	16,05	252.361	3.976.864	-282
KF-18A	74,93	47,96	252.364	3.976.864	-289
KF-18B	65,10	7,32	252.364	3.976.864	-289
KF-19	89,13	87,13	252.045	3.977.912	-306
KF-20	104,78	97,84	252.226	3.977.494	-306
KF-21	137,00	133,58	252.376	3.977.293	-282
KF-22	31,97	23,59	251.300	3.982.440	-268
KF-23	24,80	22,60	251.587	3.983.272	-223
PFM-5	20,00	14,11	252.177	3.970.894	-44
PFM-6	12,70	4,17	252.183	3.971.220	-46
PFM-7	13,95	12,05	251.797	3.971.503	-47
PFM-8	13,00	9,18	252.185	3.971.473	-46

Los materiales perforados son los siguientes:

- KF-3G (Geocontrol, 2005b):

En este sondeo se realizó la recuperación de testigo hasta los 8 m. A partir de esta cota se continuó a destroza.

Hasta los 3 m se extrajo una arena bioclástica suelta bajo la cual, y hasta los 8 m, se perforó un conglomerado biolitoclástico muy cementado de cantos centimétricos, subredondeados y poligénicos. Se observan litoclastos de origen flyschoides. La matriz es arenosa gruesa. Se describen intercalaciones de calcarenita bien cementada. El RQD de esta zona es muy cercano al 100 % en todo el tramo que presenta un grado de meteorización de GM-II. El RMRb calculado para esta zona se encuentra en torno a 60-65.

A partir de los 8 m el sondeo se continuó a destroza. La interpretación realizada en base a los parámetros de perforación y a campañas anteriores (sondeo BU-3) indica que el conglomerado puede extenderse hasta los 17 m. A partir de este punto se estima que puedan aparecer arenas bioclásticas hasta el final del sondeo, con una intercalación arcillosa entre 70 y 80 m que puede corresponderse con materiales tipo brecha.

- KF-3H (Geocontrol, 2005c):

Este sondeo se realizó a destroza (sin recuperación de testigo) hasta los 206,2 m. Los materiales extraídos a partir de este punto formaban parte de una brecha arcillosa cuaternaria compuesta por cantos heterométricos y angulosos de hasta 40 cm, procedentes de las unidades de flysch. La matriz se describe como plástica, no calcárea y con consistencia moderadamente firme a dura. La estructura es, en general, caótica.

En base a los parámetros de perforación se estima que las brechas comienzan a los 100 m de sondeo. Sobre ellas se cree que aparecen depositadas unas arenas bioclásticas con una intercalación brechoide entre 74 y 85 m. Los metros más superficiales (hasta 16 m) estarían compuestos por un conglomerado calcáreo.

- KF-3I (Geocontrol, 2005d):

En este sondeo la recuperación de testigo comenzó a los 249 m. A partir de esta cota y hasta el final del sondeo se corta una brecha arcillosa en ocasiones rojiza y en ocasiones grisácea, caótica, de matriz arcillosa. Los bloques son de origen flyschoides siendo los de naturaleza calcárea (calcarenita principalmente) los que muestran mayores tamaños (hasta 0,75 m).

En el interior del sondeo se realiza una testificación geofísica, que junto a los datos de perforación y al conocimiento de sondeos cercanos permite una estimación de la composición de los metros superiores del sondeo realizados a destroza. Esta interpretación sitúa un conglomerado calcáreo hasta los 16 m. Bajo estos, una arena bioclástica que se extiende hasta los 100 m de profundidad con una intercalación de brechas entre 76 y 84 m. A los 100 m se cree que comienzan las brechas.

- KF-10 (Geocontrol, 2005e):

La longitud de este sondeo fue de 27,66 m realizados con recuperación de testigo. El sondeo se situó sobre un depósito de brechas arcillosas con cantos flyschoides de naturaleza argilítica (muy escasos cantos calcáreos) con tamaños normalmente inferiores a 8 cm, aunque se describen algunos bloques argilíticos de hasta 45 cm. La matriz, arcillosa, presenta una consistencia firme en la mayoría de los casos, siendo en los primeros metros blanda debido a alteración.

Hasta los 4,85 m se describe una calcarenita bioclástica muy fracturada de la que prácticamente no se obtuvo testigo.

- KF-16 (Geocontrol, 2005f):

Este sondeo alcanzó los 117 m de profundidad y se ejecutó con recuperación de testigo hasta los 72,37 m.

Hasta los 10,39 m se perforó una caliza biohémica sana con cemento micrítico de muy buenas características geotécnicas. Con valores de RQD de 100 % y RMRb de 70-75.

Desde los 10,39 m hasta los 33 m se describe un conglomerado clástico bien cementado con RQD = 90-100 % y RMR de 65-95 hasta los 16 m. A partir de este punto las propiedades geotécnicas empeoran levemente pasando a RQD de en torno a 50 %, con GM II-II y RMR de 55.

Progresivamente se pasa a un conglomerado levemente cementado (33 a 40,86 m) que da paso a una arena bioclástica hasta el fin de la zona recuperada.

A partir de los 72,37 m se estima, en función de los datos recogidos previamente en la zona y de los parámetros de perforación, que las arenas alcanzan hasta los 81 m a partir de donde se encontrarían las brechas arcillosas hasta el final del sondeo.

- KF-17 (Geocontrol, 2005g):

Este sondeo se realizó en su totalidad a destroza. Basándose en los ensayos geofísicos (gamma natural, densidad y neutrón-neutrón) y a los datos de la perforación se han estimado los materiales atravesados.

Hasta los 12 m se encontraría una caliza biohémica. De 12 a 22 m un conglomerado poco cementado. Bajo el conglomerado y hasta los 84 m aparecería una arena bioclástica. A partir de los 84 m se encontraría la brecha arcillosa.

- KF-18 (Geocontrol, 2005h):

Este sondeo alcanzó los 22,15 m con recuperación de testigo. Los materiales perforados han sido margas con bancos de calcarenita. Las margas aumentan su dureza hacia muro (rechazo con el penetrómetro de bolsillo). Las calcarenitas se presentan en bancos de hasta 1 m, con grados de alteración bajos (GM II-I) y RMR de 45-50. Las margas presentan RMR más bajo (20-30) y RQD de 0 % con algún nivel de hasta 40 %. Su grado de alteración suele estar en torno al GM IV.

- KF-18A y B (Geocontrol, 2005a):

Estos dos sondeos se realizaron muy próximos. El primero se realizó con recuperación de testigo hasta los 74,93 m mientras que el segundo se comenzó a destroza y solo se recuperó testigo a partir de 53,55 m.

Los materiales perforados son principalmente margas escamosas gris verdosas con alternancia de bancos decimétricos de calcarenitas. Las superficies de fractura en las margas son lisas y brillantes. El buzamiento varía entre los 45° y la subverticalidad.

Las margas presentan una alteración elevada (GM IV-V) y valores de RMRb que raramente superan los 20. En los tramos calcareníticos el RMRb llega a subir hasta los 40 en alguna ocasión.

- KF-19 (Geocontrol, 2005i):

La profundidad alcanzada por esta perforación es de 89,13 m. Se distingue una capa superior de caliza biolitohermica como la descrita en otros sondeos que alcanza los 4,2 m de profundidad. Esta caliza pasa a una marga gris de consistencia blanda a firme que a partir de los 6,70 m pasa a una brecha arcillosa.

La brecha presenta cantos argilíticos, areniscosos y margosos con estructura caótica. Aparecen bloques que no superan el metro compuestos por areniscas micáceas. Estos bloques dejan de aparecer a partir de los 47 m. La matriz se describe como muy compacta a firme.

- KF-20 (Geocontrol, 2005j):

Este sondeo alcanza los 104 m de profundidad.

Desde el comienzo hasta los 88,20 m corta una brecha calcárea (con alguna zona margosa) de textura caótica. Con cantos argilíticos, areníticos, limolíticos y margosos, heterométricos (hasta decimétricos) con bloques de calcarenita y arenisca que no superan el metro.

Entre 88,20 y 99 m se corta un tramo de materiales tipo flysch con alternancias de margas y areniscas micáceas. El buzamiento general de este tramo parece estar en torno a 50°. La meteorización es baja (GM II) con RQD en torno a 90 % y RMRb en torno a 50.

Bajo este tramo y hasta el final del sondeo se vuelve a cortar la brecha calcárea con bloques de hasta 90 cm de arenisca y limolitas.

La interpretación de este sondeo no es sencilla debido a la aparición de brechas bajo depósitos de flysch. Esto podría deberse bien a un contacto irregular en el borde del paleocanal o bien a que el nivel de materiales tipo flysch fuera un gran bloque desprendido.

- KF-21 (Geocontrol, 2005k):

En este sondeo de 137 m de profundidad se ha localizado, a unos 117 m, el contacto entre las brechas calcáreas y el sustrato tipo flysch.

Bajo 2 m de conglomerados bioclásticos se cortan unas brechas arcillosas calcáreas con cantos polimícticos de micrita, marga, arenisca, limolita y argilita con tamaños que llegan hasta el metro. La estructura es en general caótica. La matriz arcillosa es dura.

El flysch es principalmente margoso con intercalaciones calcareníticas de espesor variable inferior al medio metro. Estos materiales se encuentran fuertemente fracturados, con presencia de superficies lisas y brillantes, y bastante alteradas (GM IV a GM II). El RQD es de 0 % en casi todo el depósito con algunos niveles de 50 o 60 %. El RMRb se sitúa entre 20 y 30 con alguna zona algo superior correspondiente a niveles calcáreos. El buzamiento general de la zona es de 60-70°.

- KF-22 (Geocontrol, 2005l):

Este sondeo alcanzó los 31,97 m de profundidad. A los 17,65 m de profundidad se localizó el contacto entre las brechas arcillosas y el flysch.

De 0 a 2,94 m se describen unas margas grises masivas muy fracturadas. Bajo estas, unas brechas arcillosas con cantos polimícticos localizándose un bloque de calcarenita de 2 m entre 6 y 8 m. Los cantos suelen ser inferiores a 12 cm.

A partir de 17,65 m se extrae una argilita gris escamosa con buzamientos de entre 30 y 65°, muy fracturada y alterada. Se encuentran algunos niveles calcareníticos de hasta 90 cm. Esta argilita parece corresponderse con una unidad de flysch.

- KF-23 (Geocontrol, 2005m):

Esta perforación corta, a lo largo de toda su longitud, materiales tipo flysch alterados. De manera general se perforan arcillas (argilitas alteradas) grises o gris verdosas muy firmes con niveles areniscos, calcareníticos y margosos de no más de 1 cm. El buzamiento general de la serie es de 15-20°.

- PFM-5 (Geocontrol, 2005n):

Este sondeo perforó materiales tipo flysch. Los metros superiores están compuestos por una argilita gris con niveles de arenisca que pasan a ser de calcarenita en profundidad. La argilita está bastante alterada a arcilla blanda.

A partir de los 11 m pasa a ser una arenisca con niveles argilíticos. Estos materiales areniscos aparecen menos alterados (GM II-I) y con RQD de 40-50 %. El RMRb calculado para este nivel es de aproximadamente 50.

- PFM-6 (Geocontrol, 2005o):

La recuperación del sondeo fue algo escasa. Los materiales perforados están compuestos por una argilita alterada gris-verdosa con estructura escamosa subvertical. La consistencia de la arcilla aumenta en profundidad pudiendo deberse a una disminución de la alteración.

- PFM-7 (Geocontrol, 2005p):

En este sondeo se perforaron 13,95 m. Los materiales atravesados son de tipo flysch.

Hasta los 3,50 m se extrajo una alternancia de margas gris-verdosas con niveles finos de arenisca. El RQD de este tramo está en torno al 80 %.

Bajo esta alternancia y hasta los 5,56 m se perforó una arenisca de grano medio a fino con un GM de II. El RQD medido fue de 50 % y el RMRb calculado de 60.

Posteriormente se extrajo un nivel de marga algo arenosa hasta los 6,10 m.

Bajo esta marga se perforó una arenisca de grano medio a fino, similar a la anterior muy sana (GM-I) y con RQD de 100 %. El RMRb calculado para este tramo fue de 65-70.

Estas areniscas pasan a unas margas gris verdosas, muy compactas con buzamientos de en torno a 45°, hasta los 13,40 m.

El nivel atravesado en los últimos 55 cm de sondeo se corresponde con una arenisca como la descrita anteriormente.

- PFM-8 (Geocontrol, 2005q):

En esta perforación se cortó una argilita gris plástica alterada con intercalaciones de limolita gris. Se observó un aumento de la consistencia en profundidad, posiblemente debido a una disminución de la alteración con la distancia a la superficie.

### 3.3 Ensayos de campo

Los ensayos de campo permiten estudiar un material geológico en su estado natural sin más alteración que la imprescindible para la realización del ensayo. Esto permite un mejor acercamiento a las características geotécnicas que mostrará frente a las acciones propias de una obra de ingeniería.

A lo largo de las diferentes fases de estudio de la conexión fija por el estrecho de Gibraltar han sido variados y numerosos los ensayos de campo que se han realizado. A continuación se recoge cada uno de ellos organizados por unidades.

#### 3.3.1 Unidad de Algeciras (Beni Ider)

En los siguientes apartados se recogen los resultados de los ensayos de campo realizados en esta unidad: ensayos presiométricos, ensayos de carga en placa, ensayos de gato plano, ensayos de carga con grippers y permeabilidad *in situ*.

##### 3.3.1.1 *Ensayos presiométricos*

##### 3.3.1.1.1 *Pozo y galerías de Malabata*

En 1996 se realiza, en el interior del pozo y galerías de Malabata una campaña de ensayos *in situ* basada en la realización de ensayos presiométricos y ensayos con gato plano (SIMECSOL, 1997).

Los ensayos presiométricos fueron interpretados según la norma francesa NF 94-110 (AFNOR, 1991). Para su realización se utilizó una sonda volumétrica de 60 mm de diámetro y una capacidad máxima de 10 MPa.

La campaña finalizó con un total de 29 ensayos válidos distribuidos por diferentes zonas dentro del conjunto de pozos y galerías (Tabla 3-12):

- Pozo principal. Nicho a -76 m. Sondeo horizontal de 15 m.
- Galería principal norte a -146 m.
- Sondeo horizontal de 20 m hacia el E.
- Sondeo de 20 m inclinado 30° hacia el NO.
- Sondeo vertical de 20 m.
- Pozo secundario. Nicho a -210 m. Sondeo horizontal de 15 m.
- Galería a -300 m.
- En la sección armada. Perforación horizontal de 18 m.
- En la prolongación del nicho. Perforación horizontal de 18 m.

Se descartó la realización de ensayos desde los nichos situados a -120 m en el pozo principal y a -260 m en el pozo secundario, por considerarse, por parte de SNED, que los materiales rocosos presentes en esa zona no justificaban la realización de este tipo de ensayos.

Tabla 3-12. Ensayos presiométricos realizados en el el pozo y galerías de Malabata.

Zona	Prof. (m)	P <sub>f</sub> (MPa)	P <sub>L</sub> (MPa)	E <sub>p</sub> (MPa)	E <sub>p</sub> /P <sub>L</sub>	P <sub>L</sub> /P <sub>f</sub>	Observaciones
Pozo principal Nicho a -76 m	6	4,9	9,2	210	22,8	1,9	-
	9	3,0	7,15	146	20,4	2,4	-
	12	4,0	8,2	175	21,3	2,0	-
	15	>9	>9	1460	-	-	-
Galería principal norte Sondeo Este	8	>6	>6	1160	-	-	Rotura de la membrana
	11	>7	>7	520	-	-	-
	14	>7	>7	370	-	-	Rotura de la membrana
	17	>7	>7	880	-	-	-
	20	>8	>8	920	-	-	-
Galería principal norte Sondeo Oeste	8	>6	>6	320	-	-	-
	11	>4	>4	540	-	-	Rotura de la membrana
	14	>6	>6	610	-	-	-
	17	>7	>7	280	-	-	-
	20	>7	>7	400	-	-	-
Galería principal norte Sondeo Oeste	8	>5	>5	99	-	-	Rotura de la membrana
	11	>6	>6	220	-	-	-
	14	>7	>7	260	-	-	Rotura de la membrana
	17	>5	>5	210	-	-	Rotura de la membrana
	20	>0,5	>0,5	48	-	-	Ensayo no válido. Diámetro del sondeo excesivo
Nicho a -210 m	8	>10	>10	230	-	-	Posible fluencia a 4 MPa
	9	>10	>10	430	-	-	Posible fluencia a 5 MPa
	12	>10	>10	240	-	-	Posible fluencia a 7 MPa
	15	>10	>10	1020	-	-	-
Galería -300 m Sección amada	6	>8	>8	370	-	-	Rotura de la membrana
	9	>1	>1	161	-	-	Diámetro del sondeo excesivo
	12	>10	>10	590	-	-	-
	15	>10	>10	250	-	-	-
	18	-	-	-	-	-	Diámetro del sondeo excesivo
Galería -300 m	6	>1	>1	99	-	-	Diámetro del sondeo excesivo
	9	>7	>7	430	-	-	Rotura de la membrana
	12	>9	>9	200	-	-	Rotura de la membrana
Prolongación del nicho	15	>6	>6	350	-	-	Rotura de la membrana
	18	>5	>5	360	-	-	Rotura de la membrana

P<sub>f</sub>: Presión de fluencia; P<sub>L</sub>: Presión límite; E<sub>p</sub>: Módulo presiométrico

De los 29 ensayos válidos, solamente en tres pudo alcanzarse la presión de fluencia y la presión límite (Nicho a -76 m). Según SETEC-TPI (1997), deberían descartarse los datos aportados por los ensayos que no alcanzaran la presión de fluencia. Si bien, estos ensayos no son útiles para la estimación de parámetros resistentes del macizo rocoso, sí lo son para la estimación de parámetros deformacionales ya que, a la vista de las curvas presiométricas, hay suficientes datos para que el módulo presiométrico obtenido sea tenido en cuenta.

En los pocos casos en los que pudo alcanzarse la presión de fluencia, los valores de E<sub>p</sub>/P<sub>L</sub> son cercanos a 20, según el informe, elevados. Estos valores son típicos de materiales rocosos o de transición roca-suelo.

En el análisis de los datos recogido en el informe se indica que los módulos de deformación pueden separarse en dos grupos:

- Un primer grupo con módulos inferiores a 700 MPa correspondiente a argilitas más o menos fracturadas.
- Un segundo grupo con módulos presiométricos superiores a 800 MPa correspondiente a los niveles calcáreos intercalados en las argilitas.

Siguiendo el método recogido en el apartado 6.1.1, se calculó el módulo de deformación del macizo  $E_M$  con los siguientes resultados (Tabla 3-13):

Tabla 3-13. Módulos de deformación calculados a partir de los ensayos presiométricos

Material	$E_p$ (MPa)	$\alpha$	$E_M$ (MPa)
Argilitas muy fracturadas	200	1/3	600
Argilitas poco fracturadas	500	1/2	1000
Niveles duros calcáreos	1000	1/2	2000

### 3.3.1.1.2 Excavación de la Galería de Tarifa

Durante los trabajos de perforación de la galería de Tarifa (véase apartado 3.1.3) se realizaron, mediante sondeos cortos perforados perpendicularmente a los paramentos de la excavación, un total de 10 ensayos presiométricos (Tabla 3-14) en la Unidad de Algeciras (García González, 1996).

Tabla 3-14. Ensayos presiométricos realizados durante la perforación de la galería de Tarifa.

Litología	Sondeo	Prof. (m)	P.m. (m)	Situación	$E_p$ (MPa)	$c'$ (kPa)	$\phi$ (°)
FMAM	S-1	2,4	109	O	3500	-	-
	S-2	2,9	109	E	5570	-	-
PR	S-3	1,1	237	O	195	-	-
	S-3	1,1	237	O	265	230	20
	S-3	1,8	237	O	351	110	21
	S-4	1,0	237	E	454	-	-
	S-4	1,0	237	E	333	100	21
	S-4	1,8	237	E	1980	110	20
	S-4	1,8	237	E	1980	110	20
FC	S-5	2,5	373	O	5560	-	-
	S-6	2,6	373	E	1124	500	32

$E_p$ : Módulo presiométrico;  $c'$ : cohesión aparente;  $\phi$ : ángulo de rozamiento; FMAM: Flysch margo-areniscoso micáceo; PR: Pelita roja; FC: Flysch calcáreo; O: hastial oeste; E: hastial este

Como valor medio del módulo presiométrico se da el siguiente:

$$- E_p = 2725 \text{ MPa}$$

Si bien los datos de cohesión ( $c$ ) y ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ) calculados, parecen bastante razonables, la medida de este parámetro mediante ensayos presiométricos en materiales arcillosos no parece del todo razonable y, por tanto, éstos han de tomarse con mucha precaución.

### 3.3.1.2 Ensayos de carga con placa

#### 3.3.1.2.1 Pozo de Malabata

En el complejo de pozos y galerías experimentales de Malabata (véase apartado 3.1.4) se realizaron un total de 21 ensayos de carga con placa de 60 cm de diámetro (Tabla 3-15). Los ensayos se ejecutaron sobre materiales arcillosos, momentos después de ser estos excavados, en nichos realizados a tal efecto. En cada uno de los nichos se ejecutaron dos ensayos, uno con la aplicación de carga horizontal y otro con aplicación vertical.



La realización de los ensayos corrió a cargo del *Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes* (LPEE, 1994a, 1994d, 1994e, 1994f, 1995a, 1996b, 1996a, 1996c).

En cada uno de los ensayos se planearon varios ciclos de carga-descarga alcanzando diferentes presiones máximas en cada uno. La tensión máxima alcanzada en los ensayos fue de 32 bar. En los ensayos se midió el módulo de deformación global ( $E_I$ ) y el módulo de deformación elástico correspondiente a los ciclos ( $E_R$ ).

En varios de los ensayos se realizaron pruebas de fluencia de larga duración (24 o 48 h), manteniendo, en la parte alta del ciclo, la presión constante. En el informe de los ensayos (LPEE, 1996c) se menciona que estos ensayos no son concluyentes debido a que el terreno no soporta presiones suficientes para superar las limitaciones debidas a las tensiones naturales.

Tabla 3-15. Resultados de los ensayos de carga con placa en el complejo de Malabata.

Nivel	Localización	Ensayo vertical			Ensayo horizontal		
		$E_I$ (MPa)	$E_R$ (MPa)	$E_R/E_I$	$E_I$ (MPa)	$E_R$ (MPa)	$E_R/E_I$
- 76	Pozo		Rotura		208	1363	6,06
- 120	Pozo	1499	3868	2,6	1678	5280	3,1
- 147	Gal. E 7.5	6371	9182	1,4	2101	7385	3,5
	Gal. E 28.5	6371	9182	1,4	2101	7385	3,5
	Gal. O 7.5	-----	Rotura	-----	95	1082	11,4
	Gal. E 49	344	1616	4,7	-----	Rotura	-----
	Gal. E 60	1205	1970	1,6	184	1428	7,8
	Gal. Principal	282	1202	4,3	524	2152	4,1
- 210	Pozo	2429	4978	2,0	5436	8797	1,6
-300	Gal. NE 10.10	1369	1172	0,9	828	2864	3,5
	Gal. 35.6	273	1340	4,9	367	1535	4,2

$E_I$ : módulo de deformación global;  $E_R$ : modulo elástico medido en los ciclos

A la vista de las diferencias medidas entre los ensayos verticales y horizontales, así como entre las dos placas de un mismo ensayo se puede asegurar que el terreno presenta un comportamiento anisótropo y heterogéneo.

### 3.3.1.3 Ensayos de Gato Plano

#### 3.3.1.3.1 Emplazamiento de Malabata

En el interior del complejo de pozos y galerías de Malabata (véase apartado 3.1.4), la compañía SIMECSOL realizó, en 1996, 15 ensayos de gato plano repartidos en 5 puntos.

Los ensayos se localizaron en 4 zonas de ensayo situadas en la galería existente en el nivel situado a -147 m. Estos puntos se denominaron SE-1, SE-2, SE-3 y SE-5 (Figura 3-36).

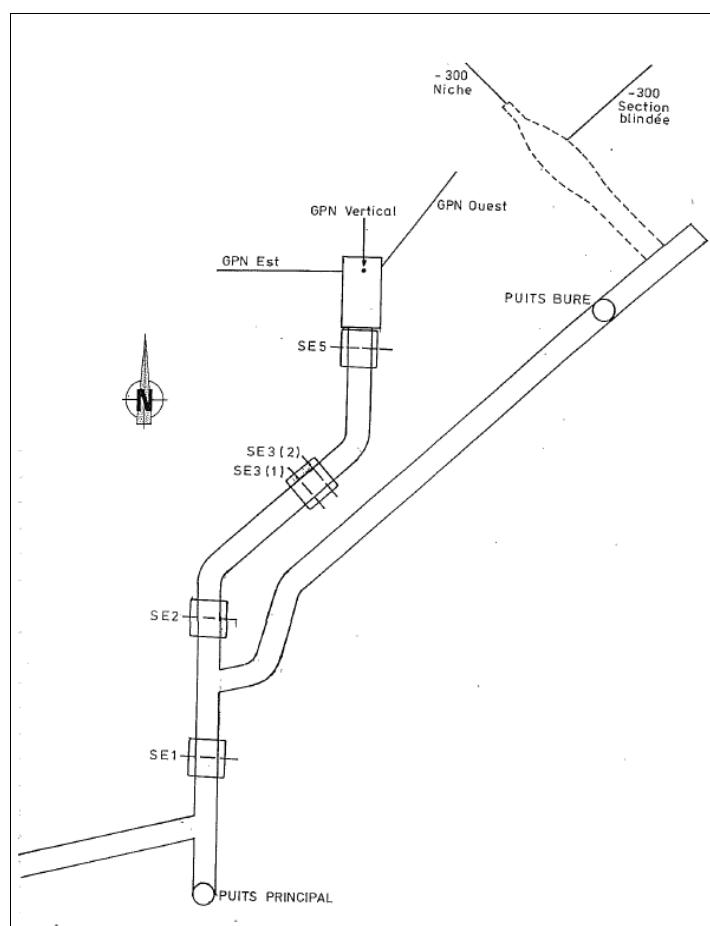


Figura 3-36. Localización de los ensayos de gato plano en el nivel -147 m de Malabata.

Debido a la gran fracturación del material se decidió realizar los ensayos en el recubrimiento de hormigón en lugar de en el propio macizo rocoso. Esto impidió la medida del módulo de deformación del macizo aunque, según los autores, sí permitió la estimación de las tensiones verticales y horizontales (Tabla 3-16), así como la relación entre estas ( $K$ ).

Para la interpretación de los ensayos se ha calculado una relación entre la tensión natural del terreno y la tensión medida en el revestimiento de 1:5 para la geometría existente (radio de la excavación 5 m y espesor del revestimiento de 0,5 m).

Tabla 3-16. Resultados de los ensayos de gato plano realizados en Malabata.

Zona	Tensión medida (MPa)			Tensiones <i>in situ</i> calculadas (MPa)		
	OESTE	CLAVE	ESTE	$\sigma_H$	$\sigma_V$	$K$
SE-1	11,5	10,0	18,0	3,0	2,0	0,67
SE-2	10,0	6,0	11,0	2,1	1,2	0,57
SE-3 (1)	11,4	14,6	19,0	3,0	2,9	0,96
SE-3 (2)	16,2	14,2	16,1	3,2	2,8	0,88
SE-5	15,3	12,6	14,7	3,0	2,3	0,84

$\sigma_H$ : tensión horizontal;  $\sigma_V$ : tensión vertical;  $K$ :  $\sigma_H / \sigma_V$

A la vista de los resultados recogidos en la Tabla 3-16 se pueden estimar unos parámetros medios para las tensiones naturales en el nivel -147 m de Malabata:

$$- \sigma_H = 2,8 \text{ MPa} \quad - \sigma_V = 3,0 \text{ MPa} \quad - K \approx 0,9$$

Estas medidas asumen una tensión isotropa en el plano horizontal si bien es conocido que las tensiones en esta zona tienen una importante componente tectónica que hace que esta suposición pueda no ser del todo cierta. Por otra parte, habría sido necesarios al menos seis ensayos en diferentes direcciones para una completa definición del tensor de tensiones actuante en este punto.

### 3.3.1.4 Ensayos de carga con grippers

Estos ensayos se realizaron en la misma campaña que los recogidos en el apartado 3.3.4.2 durante la perforación de la Galería de Tarifa. En la Tabla 3-17 se recogen los resultados de los ensayos:

Tabla 3-17. Ensayos de carga con grippers realizados durante la perforación de la galería de Tarifa

Litología	P.m. (m)	Zapata	Borde	$E_G$ (MPa)	$E_{GD}$ (MPa)	$E_{GR}$ (MPa)
FMAM	109	O	N	1457	4249	3187
	212	O	S	1085	2291	2628
		O	N	1153	2190	2278
PR		E	S	544	-	-
	235	E	N	413	-	-
	280	O	S	283	4061	1586
FC	352	E	S	79	1416	64
	355	E	N	63	1597	68
		E	S	708	2268	2203
	362	E	N	2266	3462	3400
		E	S	290	2720	1700
	372	E	N	541	2676	1841
		E	S	1889	3462	1943
	378	E	N	2000	6799	5666
		E	S	1005	6799	3960
	388	E	N	806	3683	3090

$E_G$ : Módulo de la primera carga;  $E_{GD}$ : Módulo en descarga del ciclo;  $E_{GR}$ : Módulo en recarga del ciclo; FMAM: Flysch margo-arenoso micáceo; PR: Pelita roja; FC: Flysch calcáreo.

Como valores medios se dan los siguientes (García González, 1996):

- $E_G = 913 \text{ MPa}$
- $E_{GD} = 3405 \text{ MPa}$
- $E_{GR} = 2401 \text{ MPa}$

### 3.3.1.5 Ensayos de permeabilidad in situ

#### 3.3.1.5.1 Segunda campaña de sondeos en Marruecos

En los sondeos de esta campaña (véase apartado 3.2.3) se realizaron 45 ensayos Lugeon y 11 ensayos Lefranc a carga variable. En la Tabla 3-18 y Tabla 3-19 se recogen los resultados de estos ensayos.

Tabla 3-18. Resultados de los ensayos Lugeon realizados en la 2ª campaña de sondeos en Marruecos (CMS, 1992). Los materiales pertenecen a la Unidad de Algeciras.

Sondeo	Tramo (m)	Unidades Lugeon
SB-1	27,7 – 29,4	0,3
	48,45 – 50,45	0,3
	71,2 – 73,2	Imperm.
	98,7 – 102,2	Imperm.
SB-2	22 – 25	Imperm.
	63 – 65	6,4
	99 – 100,9	0,6
	124,6 – 125,6	0,7
SB-3	24,6 – 26,35	2,4
	71 – 73	0,5
	123,15 – 125,15	1,4
	144 – 146,3	0,8
SB-4	38 – 40	0,3
	90,6 – 92,6	1,1
	111,8 – 114,8	0,8
	148,6 – 150,9	0,3
SB-5	23,7 – 25,7	1,5
	77,7 – 78,9	2,3
	147,6 – 150	0,5
	172,85 – 175,85	0,9
SB-6	192,9 – 195,4	0,3
	36,9 – 38,6	8
	52 - 53	2,5
	80,3 – 81,2	5
SB-7	123 – 125	Imperm.
	141,9 – 143,9	Imperm.
	22,5 – 24,5	0,2
	68 – 69,7	0,4
SB-8	99 – 101	0,4
	6 – 8	21
	10 – 12,65	4
	15 – 17	>100
SB-9	21 – 22,8	2
	30,5 – 32,5	1
	36 – 38	1
	40,5 – 42,5	Imperm.
SB-10	45,5 – 47,5	1
	7 - 10	>100
	11 – 13	>100
	19 – 21	Imperm.
SB-10	24 – 26,1	10
	11 – 13	20
	19,1 – 22,1	Rotura
	29 – 32	Imperm.
SB-10	37 – 40,15	Imperm.

Tabla 3-19. Resultados de los ensayos Lefranc realizados en la 2ª campaña de sondeos en Marruecos (CMS, 1992). Los materiales pertenecen a la Unidad de Algeciras.

Sondeo	Tramo (m)	Permeabilidad (m/s)
SB-1	15.0 – 15.5	Impermeable
SB-2	39.3 – 39.8	$7 \cdot 10^{-6}$
	85.0 – 85.5	Impermeable
SB-3	45.0 – 45.6	$10^{-7}$
	100.3 – 100.8	$10^{-7}$
SB-4	15,4 – 16,1	$2 \cdot 10^{-7}$
SB-5	65 – 65,5	$10^{-7}$
	54,0 – 54,5	$10^{-8}$
	100,0 – 100,50	Impermeable
SB-6	53,5 – 54,0	$2 \cdot 10^{-8}$
	100,0 – 100,5	Impermeable

### 3.3.2 Unidad de Bolonia (Tala Lakrah)

En los siguientes apartados se recogen los resultados de los ensayos de campo realizados en esta unidad: ensayos de carga con placa, corte directo *in situ*, ensayo Lugeon y determinación de la densidad *in situ* por el método de la arena.

#### 3.3.2.1 *Ensayos de carga con placa*

##### 3.3.2.1.1 *Zanja V*

En este emplazamiento se utilizó una placa de carga de 45 cm de diámetro con un esquema de ensayo similar al recogido en la Figura 3-40. Según el esquema de la Figura 3-6, se realizaron 2 ensayos en esta zona (Tabla 3-20).

En los ensayos se realizaron dos ciclos de carga-descarga alcanzándose, en el segundo ciclo una presión máxima de 7,25 kp/cm<sup>2</sup>. En la interpretación se supuso un medio elástico.

Los materiales ensayados se corresponden con la sucesión de Pelitas Rojas de la Unidad de Bolonia.

Tabla 3-20. Resultados de los ensayos de carga con placa realizados en la Z-V (CEDEX, 1987a).

Ensayo	Escalón (kp/cm <sup>2</sup> )	Módulo en carga (MPa)	Módulo en descarga (MPa)
1	0 – 4	458	964
	0 – 7	358	716
	4 – 7	281	2250
2	0 – 4	643	964
	0 – 7	492	716
	4 – 7	375	1446

Si bien, los resultados obtenidos en esta zanja son mayores que los obtenidos en las zanjas anteriores (realizada en la Unidad de Almarchal), siguen siendo algo bajos para macizos rocosos sanos. Esto puede deberse a la alteración de estos materiales tan cercanos a la superficie.

##### 3.3.2.1.2 *Zanja VI*

En este emplazamiento se realizaron, según el esquema recogido en la Figura 3-8, dos ensayos de carga con placa (Tabla 3-21). La técnica empleada fue igual a la seguida en la Zanja V. Los materiales ensayados se corresponden con la sucesión basal de la Unidad de Bolonia.

Tabla 3-21. Resultados de los ensayos de carga con placa realizados en la Z-V (CEDEX, 1987a).

Ensayo	Escalón (kp/cm <sup>2</sup> )	Módulo en carga (MPa)	Módulo en descarga (MPa)
1	0 – 4	22	64
	0 – 7	18	70
	4 – 7	15	199
2	0 – 4	25	81
	0 – 7	14	61
	4 – 7	89	143

Al igual que ha ocurrido en otras zanjas, los módulos de deformación obtenidos son muy bajos para tratarse de un macizo rocoso más o menos sano, debiendo de tomarse como parámetros propios de las zonas alteradas y más superficiales de las unidades ensayadas.

### 3.3.2.2 Ensayos de resistencia al corte directo *in situ*

#### 3.3.2.2.1 Zanja V

En la Zanja V se ensayaron cuatro probetas dispuestas según el esquema recogido en la Figura 3-7.

Los materiales ensayados pertenecen a la serie de Pelitas rojas de la Unidad de Bolonia (véase apartado 3.1.1.4).

Los ensayos se desarrollaron siguiendo el esquema recogido en la Figura 3-43.

Las presiones normales aplicadas a las probetas fueron de 4,5 kp/cm<sup>2</sup> para la P-I; 3,0 kp/cm<sup>2</sup> para la P-II; 2,0 kp/cm<sup>2</sup> para la P-III y 1,0 kp/cm<sup>2</sup> para la P-IV.

Los parámetros resistentes calculados para los materiales del emplazamiento Z-V son los siguientes (Figura 3-37):

- $c = 66 \text{ kPa}$
- $\phi = 43^\circ$

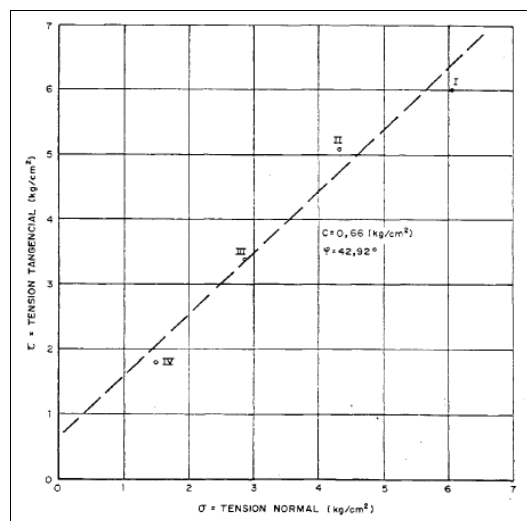


Figura 3-37. Resistencia al corte de los materiales de la Z-V. Se muestra la línea de resistencia intrínseca (CEDEX, 1987a).

#### 3.3.2.2.2 Zanja VI

En la Zanja VI se ensayaron cuatro probetas dispuestas según el esquema recogido en la Figura 3-8.

Los materiales ensayados pertenecen a la serie basal de la Unidad de Bolonia (véase apartado 3.1.1.5).

Los ensayos se desarrollaron siguiendo el esquema recogido en la Figura 3-43.

Las presiones normales aplicadas a las probetas fueron de 1,0 kp/cm<sup>2</sup> para la P-I; 4,0 kp/cm<sup>2</sup> para la P-II; 3,0 kp/cm<sup>2</sup> para la P-III y 1,0 kp/cm<sup>2</sup> para la P-IV.

Los parámetros resistentes calculados para los materiales del emplazamiento Z-V son los siguientes (Figura 3-38):

- $c = 150 \text{ kPa}$
- $\phi = 16^\circ$

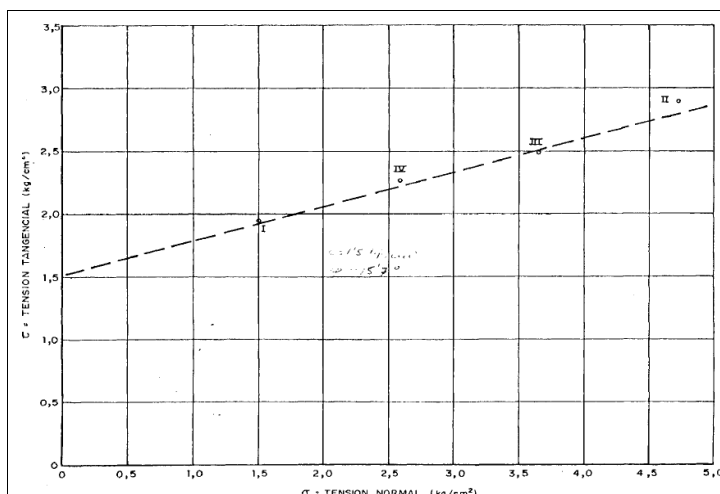


Figura 3-38. Resistencia al corte de los materiales de la Z-VI. Se muestra la línea de resistencia intrínseca (CEDEX, 1987a).

### 3.3.2.3 Ensayos de permeabilidad

Los ensayos de permeabilidad recogidos son de tipo Lugeon y Lefranc.

#### 3.3.2.3.1 Campaña de sondeos de 1982-1983

Dentro de esta campaña de reconocimientos (véase apartado 3.2.1) se realizaron un total de cuatro ensayos Lugeon en el interior de los sondeos S-2, S-3 y S-4 con los resultados recogidos en la Tabla 3-22.

Tabla 3-22. Resultados de los ensayos Lugeon realizados en la campaña de sondeos de 1982-1983 (SECEG, 1983b).

Sondeo	Tramo (m)	Unidades Lugeon
S-2	38,25 – 230,00	0,18
S-3	29,11 – 44,10	0,14
S-3	58,25 – 76,96	0,16

### 3.3.2.4 Ensayos de densidad *in situ* por el método de la arena

#### 3.3.2.4.1 Zanja V

En la zanja V se realizaron seis medidas de la densidad *in situ* (Tabla 3-23). En la Figura 3-7 aparecen los puntos de realización de cada ensayo. Los materiales ensayados pertenecen a la serie de Pelitas rojas de la Unidad de Bolonia (véase apartado 3.1.1.4).

Tabla 3-23. Resultados de los ensayos de densidad *in situ* realizados en el emplazamiento Z-V (CEDEX, 1987a).

Muestra	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	Humedad (%)
D-1	1460	18,1
D-2	1620	15,2
D-3	1450	17,4
D-4	1520	13,5
D-5	1710	13,8
D-6	1450	15,7

### 3.3.2.4.2 Zanja VI

En este punto, situado sobre materiales de la serie basal de la Unidad de Bolonia (véase apartado 3.1.1.5), se realizaron seis determinaciones de la densidad *in situ* (Tabla 3-24). Las localizaciones de los ensayos se encuentran recogidas en el esquema de la Figura 3-8.

Tabla 3-24. Resultados de los ensayos de densidad *in situ* realizados en el emplazamiento Z-VI (CEDEX, 1987a).

Muestra	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	Humedad (%)
D-1	1600	22,5
D-2	1650	20,1
D-3	1570	22,6
D-4	1600	22,8
D-5	1660	22,5
D-6	1600	22,9

### 3.3.2.4.3 Pozo de Malabata

En el complejo de pozos y galerías experimentales de Malabata se realizaron 47 determinaciones de la densidad *in situ* (LPEE, 1994b, 1994i, 1994j, 1994c, 1994d, 1994e, 1994g, 1994h, 1995b, 1995c, 1995d; MECASOL, 1996).

Estos ensayos se realizaron sobre el material recién excavado según el avance de la perforación de los pozos y las galerías.

En la Tabla 3-25 y Tabla 3-26 se muestran los resultados de estos ensayos realizados por el LPEE y por MECASOL, respectivamente:

Tabla 3-25. Ensayos de densidad *in situ* realizados en Malabata por el LPEE.

Lugar		Material	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)
Pozo principal	-12,3	Argilita gris	2020	1710	18,2
	-22,0	Argilita gris	1950	1710	14,0
	-26,7	Argilita gris	2000	1740	14,9
	-32,6	Argilita gris	1820	1590	14,7
	-43,4	Argilita gris	1820	1630	12,0
	-55,3	Argilita gris	2050	1820	12,6
	-66,6	Argilita gris	1920	1690	13,8
	-77,0	Argilita gris laminada	2020	1800	12,4
	-107,0	Argilita gris	2130	1850	14,9
	-118,0	Argilita gris laminada	2620	2380	10,0
	-127,0	Argilita gris	2150	1920	11,9
Galería Principal -147 m	57,5	Argilita gris laminada	2090	1950	7,4
	62,5	Argilita gris laminada	2080	1880	11,2
	66	Argilita gris	2110	1920	10,1
	69	Argilita fracturada	2020	1850	9,5



Lugar	Material	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)
80	Argilita triturada	2500	2300	8,7
83	Argilita triturada	2060	1850	11,4
84-85	Argilita triturada	2070	1850	11,8
86	Argilita triturada	2200	1980	11,5
87	Argilita negruzca	2200	1830	13,8
88	Argilita triturada	2250	1920	13,7
95	Argilita gris	2300	2150	6,9
Galería Este -147 m	34 Argilita gris	2300	2100	9,6
42	Argilita gris	2290	2000	14,6
44	Argilita gris fracturada	2150	1880	14,2
Segundo Pozo	-230 Argilita gris con margas negras	2240	2070	8,0
-280	Argilita gris verdosa diaclasada	2260	2070	9,5
-289	Argilita gris laminada	2280	2130	7,1

$\rho_d$ : densidad seca;  $\rho_{ap}$ : densidad aparente;  $\omega$ : humedad

Tabla 3-26. Ensayos de densidad *in situ* realizados en Malabata por MECASOL.

Lugar		Material	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ap}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	Sr (%)
Pozo principal	Nicho	Argilita gris	2147	1910	11,8	77
	-76 m	Argilita gris	2210	1960	12,9	98
	Nicho	Argilita gris	2130	1910	11,6	76
	-120 m	Argilita gris	2200	1960	12,1	87
Galería Este -147 m	EVG5	Argilita gris	2130	1890	12,4	80
	EVG4	Argilita gris	2090	1840	13,9	81
		Argilita gris	2190	1940	13,1	91
	GE-1	Argilita gris	2220	2010	10,7	82
	GE-2	Argilita gris	2280	2010	13,5	100
Galería Norte -147 m	EVG7 (SE5)	Argilita gris	2210	2010	9,7	76
		Argilita gris	2260	2080	8,9	80
		Argilita gris	2240	2000	12,0	92
Segundo pozo	Nicho	Argilita negra	2430	2300	6,0	91
	-120 m	Argilita negra	2370	2230	6,0	76
Galería -300 m	EVG301	Argilita negra	2230	2050	9,1	77
		Argilita negra	2180	2010	8,4	96
	EVG302	Argilita negra	2070	1920	9,4	66
		Argilita negra	2090	1920	8,9	62
		Argilita negra	2340	2140	9,6	100
		Argilita negra	2270	2060	10,2	94

$\rho_d$ : densidad seca;  $\rho_{ap}$ : densidad aparente;  $\omega$ : humedad; Sr: grado de saturación

### 3.3.3 Unidad de Facinas (Mellousa)

No se ha recogido en la bibliografía ningún ensayo *in situ* realizado en estos materiales.

### 3.3.4 Unidad de Almarchal (Tanger)

En los siguientes apartados se recogen los resultados de los ensayos de campo realizados en esta unidad: ensayos presiométricos, de carga con placa, de carga con grippers, corte directo *in situ*, Lugeon, Lefranc y densidad *in situ* por el método de la arena.

### 3.3.4.1 Ensayos presiométricos

#### 3.3.4.1.1 Campaña de sondeos 1982-1983

En 1983 el, denominado en aquel momento, “Laboratorio de carreteras y geotecnia Jose Luis Escario” del CEDEX realizó, a petición de SECEG, una campaña de ensayos presio-dilatométricos en los sondeos S-7 (CEDEX, 1983b) y S-9 (CEDEX, 1983c) de la campaña de sondeos 1982-1983.

Como se recoge en el apartado 3.2.1, estos dos sondeos fueron realizados, íntegramente sobre materiales pertenecientes a la Unidad de Almarchal (Tanger). El equipo utilizado fue una sonda Mazier de 98 mm de diámetro y una capacidad máxima de 10 MPa. En la Tabla 3-27 se recogen los resultados de estos ensayos.

Tabla 3-27. Resultados de la campaña presiométrica CEDEX-1983.

Sondeo	Profundidad (m)	$G_p$ (MPa)	$E_p$ (MPa)
S-9	35,5	94,0	244
S-9	37,5	60,2	156
S-9	41,7	37,7	98
S-9	45,1	101,0	263
S-9	46,1	34,8	90
S-7	19,1	46,4	121
S-7	39,4	35,8	93
S-7	40,4	80,8	210
S-7	43,7	61,3	159
S-7	44,7	140,2	364
S-7	47,7	194,2	505

$G_p$ : módulo de corte presiométrico;  $E_p$ : módulo presiométrico

#### 3.3.4.1.2 Excavación de la Galería de Tarifa

Durante los trabajos de perforación de la galería de Tarifa (véase apartado 3.1.3) se realizaron, mediante sondeos cortos perforados perpendicularmente a los paramentos de la excavación, un total de 12 ensayos presiométricos (Tabla 3-28).

Tabla 3-28. Ensayos presiométricos realizados durante la perforación de la galería de Tarifa (García González, 1996).

Sondeo	Prof. (m)	P.m. (m)	Situación	$E_p$ (MPa)	$E_R$ (MPa)	$c'$ (kPa)	$\phi$ (°)
S-9	1,4	430	E	144	-	100	15
S-10	3,0	430	SOLERA	239	196	-	-
S-10	7,5	430	SOLERA	132	223	140	11
S-7	0,8	446	E	89	-	-	-
S-7	1,7	446	E	257	-	100	15
S-11	3,7	449	SOLERA	77	910	100	15
S-11	10,0	449	SOLERA	130	165	210	11
S-12	3,4	485	SOLERA	602	-	60	25
S-12	10,3	485	SOLERA	474	488	-	-
S-8	1,2	490	O	1082	-	30	33
S-8	2,2	490	O	2100	-	150	21
S-13	10,0	499	SOLERA	2098	-	-	-

$E_p$ : módulo presiométrico;  $E_R$ : módulo presiométrico en recarga;  $c'$ : cohesión;  $\phi$ : ángulo de rozamiento interno; O: hastial oeste; E: hastial este

Si bien los datos de cohesión ( $c$ ) y ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ) calculados, parecen bastante razonables, la medida de este parámetro mediante ensayos presiométricos en materiales arcillosos no parece del todo razonable y, por tanto, estos han de tomarse con mucha precaución.

### 3.3.4.2 Ensayos de carga con placa

Este tipo de ensayos se realizaron en las zanjas experimentales explicadas en el apartado 3.1.1 y en el complejo de excavaciones realizadas en Malabata (véase apartado 3.1.4).

#### 3.3.4.2.1 Zanja I

En este emplazamiento, situado en materiales pertenecientes a la Unidad de Almarchal, se realizaron dos ensayos horizontales con placas de 60 cm de diámetro siguiendo el esquema de la Figura 3-39.

Los ensayos se realizaron en 3 ciclos de carga-descarga, con una carga máxima que aumentaba de un ciclo al siguiente. La tensión máxima alcanzada fue de 5 kp/cm<sup>2</sup>. Los resultados principales de estos ensayos se recogen en la Tabla 3-29. La interpretación de estos ensayos supuso medio elástico.

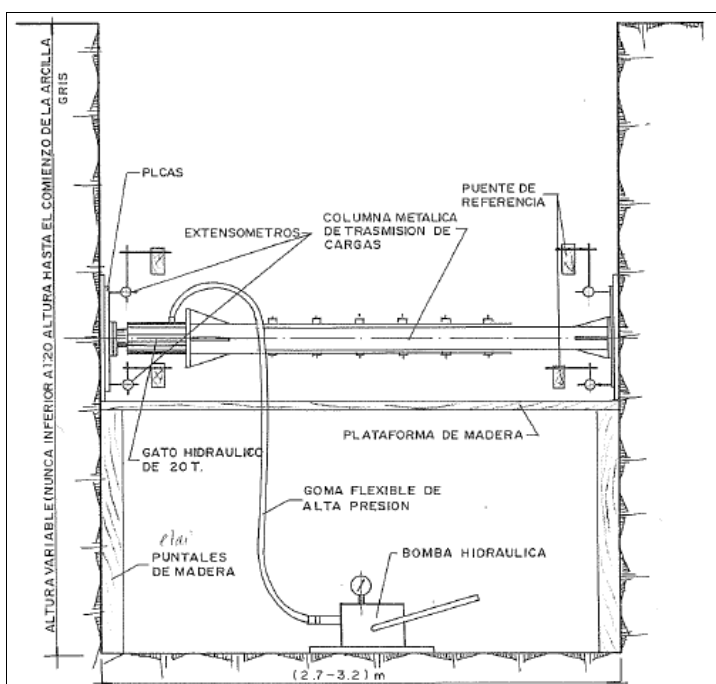


Figura 3-39. Esquema de la realización de los ensayos de carga con placa horizontales en la zanja Z-I (CEDEX, 1985a).

Tabla 3-29. Resultados de los ensayos de carga con placa realizados en la Z-I.

Ensayo	Pared	Ciclo	E (MPa)
1	NE	1	54,5
		2	100,0
	SO	1	128,6
		2	160,7
2	NE	1	128,6
		2	120,0

Ensayo	Pared	Ciclo	E (MPa)
		3	180,0
		1	195,7
	SO	2	450,0
		3	529,4

*E: módulo de deformación*

En estos resultados, se aprecia un claro incremento con los ciclos, debido al cierre, con carácter no reversible, de fisuras y discontinuidades. Los módulos de deformación son bajos para lo que se espera en un macizo rocoso de estas características, si bien, teniendo en cuenta el estado de alteración y fisuración que presenta el material (véase apartado 3.1.1.1), pueden ser razonables.

### 3.3.4.2.2 Zanja III

En este emplazamiento se realizaron dos ensayos verticales de carga con placa (Tabla 3-30) de 47 cm de diámetro según la Figura 3-40. La capacidad máxima de carga fue de 6 kp/cm<sup>2</sup>, si bien no pudo alcanzarse durante los ensayos (CEDEX, 1985b). Estos ensayos se planificaron con tres ciclos de carga-descarga con presiones máximas de cada ciclo progresivas y suponiendo un medi elástico.

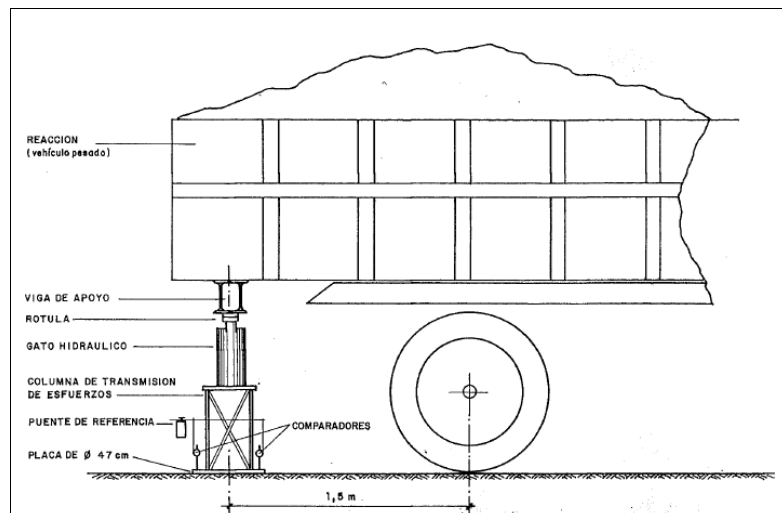


Figura 3-40. Esquema de los ensayos de carga con placa realizados en los emplazamientos Z-III y Z-IV (CEDEX, 1985b).

El ensayo número 1 se realizó sobre materiales algo heterogéneos de la unidad de Almarchal, compuestos principalmente por argilitas grises con algunas calizas. En algún punto se observaron zonas marronáceas correspondientes a materiales alterados.

El ensayo número 2, en cambio, se realizó sobre materiales más homogéneos, compuestos por argilitas homogéneas con ligeras zonas alteradas y fisuradas. Estos materiales pertenecían a la misma Unidad de Almarchal.

Tabla 3-30. Resultados de los ensayos de carga en placa realizados en la Z-III

Ensayo	Ciclo	E (MPa)
1	1	15,1
	2	78,5

Ensayo	Ciclo	E (MPa)
2	3	32,6
	1	67,1
	2	160,2
	3	185,5

*E: módulo de deformación*

Al igual que en la Z-III, los módulos calculados parecen muy bajos, lo cual nos indica que los materiales ensayados se corresponden, muy posiblemente, con niveles alterados.

#### 3.3.4.2.3 Zanja IV

En este emplazamiento se realizaron tres ensayos verticales de carga (Figura 3-6), del mismo modo que se realizaron en la Z-III (véase apartado 3.3.4.2.2).

Los ensayos se realizaron en los siguientes materiales de la Unidad de Almarchal (Figura 3-6):

- Ensayo 1: Argilitas blandas poco fisuradas con algún nivel arenoso de hasta 3 cm. Los planos de discontinuidad se corresponden, principalmente, con planos de estratificación. El material aparece húmedo.
- Ensayo 2: Litología semejante a la del ensayo 1 pero con mayor grado de fisuración. No se distinguen planos de discontinuidad. El material presenta elevada humedad.
- Ensayo 3: Características intermedias a las de los ensayos 1 y 2, alguna pasada areniscosa y fisuración moderada.

Como se ha comentado en el apartado 3.1.2.9, la Unidad de Almarchal presenta, normalmente, una baja permeabilidad. Por esto, el estado de humedad de las paredes de la excavación parece indicar cierto grado de alteración o fisuración en los materiales ensayados, que como se verá a continuación ha disminuido la rigidez de los mismos.

En la Tabla 3-31 se recogen los principales resultados de los tres ensayos realizados en la Z-IV (CEDEX, 1985b).

Tabla 3-31. Resultados de los ensayos de carga con placa realizados en la Z-IV.

Ensayo	Ciclo	E (MPa)
1	1	18,4
	2	37,1
2	1	14,9
	2	50,4
3	1	8,8
	2	26,7

*E: módulo de deformación*

Los módulos de deformación calculados presentan valores muy bajos, correspondientes a macizos rocosos muy alterados o a suelos.

#### 3.3.4.3 Ensayos de carga con grippers

Durante la perforación de la galería experimental de Tarifa (véase apartado 3.1.3), se realizaron varios ensayos de carga-deformación, a semejanza de los ensayos de carga con placa, utilizando para ellos la reacción de los *grippers* de apoyo de la máquina tuneladora (TBM) empleada en la excavación (Geocontrol, 1995b).

Para este fin se instrumentaron las zapatas de los *grippers* para poder medir las deformaciones inducidas en el terreno una vez entradas estas en carga. Estas zapatas presentaban unas dimensiones de 63x40 cm y la carga máxima aplicada fue de 13 MPa. En casi la totalidad de los ensayos se realizó un ciclo de descarga-recarga. La interpretación de los ensayos se realizó de manera similar a los ensayos de carga con placa (Tabla 3-32).

Tabla 3-32. Ensayos de carga con *grippers* realizados durante la perforación de la galería de Tarifa.

P.k.	Zapata	Borde	$E_G$ (MPa)	$E_{GD}$ (MPa)	$E_{GR}$ (MPa)
0+431	E	S	91	627	531
	E	N	81	444	541
0+474	O	S	36	450	135
	O	S	91	125	310
0+494	O	N	82	-	-
	O	S	121	2226	2069
0+516	O	N	121	1207	1207

$E_G$ : Módulo de la primera carga;  $E_{GD}$ : Módulo en descarga del ciclo;  $E_{GR}$ : Módulo en recarga del ciclo

Como valores medios de los módulos de deformación se dan los siguientes (García González, 1996):

- $E_G = 90$  MPa
- $E_{GD} = 880$  MPa
- $E_{GR} = 799$  MPa

#### 3.3.4.4 Ensayos de resistencia al corte directo *in situ*

Para la ejecución de este ensayo se somete a diferentes probetas de terreno, previamente talladas manualmente *in situ*, a una presión normal constante y a otra tangencial, creciente hasta rotura, mediante gatos hidráulicos.

Con la variación de la presión normal, en sucesivas probetas, se obtienen diferentes resultados, a partir de los cuales se determina la línea de resistencia intrínseca del material ensayado.

En líneas generales se siguió el método recomendado por la Comisión para Normalización de ensayos de campo y de laboratorio de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1974).

Estos ensayos se realizaron en las zanjas experimentales explicadas en el apartado 3.1.1. En todos estos ensayos las dimensiones de las probetas fueron de 50 cm de lado por 30 cm de altura.

##### 3.3.4.4.1 Zanja I

En este emplazamiento se ensayaron cuatro probetas situadas según se indica en el esquema de la Figura 3-4.

En la Figura 3-41 se muestra el esquema general de los ensayos. Se puede observar como las muestras fueron talladas en la pared SO de la zanja, realizándose el ensayo sobre un plano vertical.

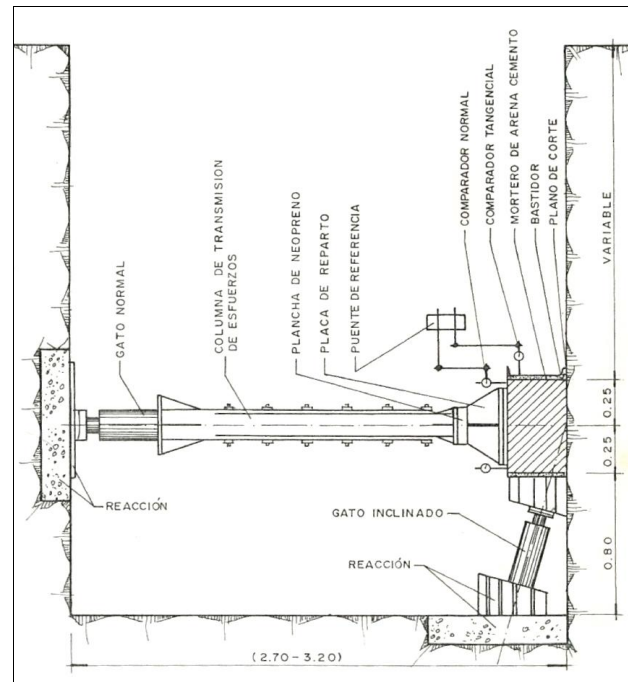


Figura 3-41. Esquema de los ensayos de corte directo *in situ* realizados en Z-I (CEDEX, 1985a).

Las presiones normales aplicadas a las probetas fueron de  $2,0 \text{ kp/cm}^2$  para la P-I;  $0,5 \text{ kp/cm}^2$  para la P-II;  $1,0 \text{ kp/cm}^2$  para la P-III y  $3,0 \text{ kp/cm}^2$  para la P-IV.

Los parámetros resistentes calculados para los materiales del emplazamiento Z-I son los siguientes (Figura 3-42):

- $c = 87 \text{ kPa}$
- $\phi = 4^\circ$

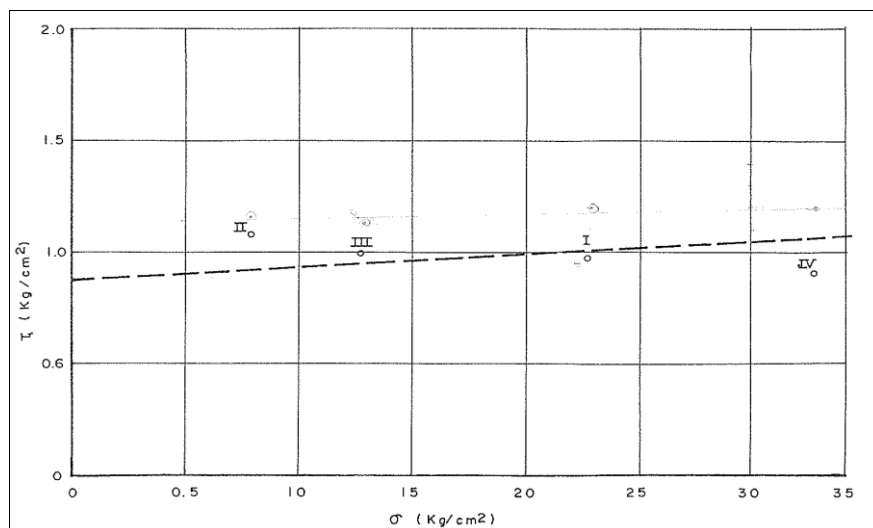


Figura 3-42. Resistencia al corte de los materiales de la Z-I. Se muestra la línea de resistencia intrínseca (CEDEX, 1985a).

### 3.3.4.4.2 Zanja III

En este emplazamiento se ensayaron cuatro probetas situadas según se indica en el esquema de la Figura 3-5.

En la Figura 3-43 se muestra el esquema general de estos ensayos. Al contrario de cómo ocurría en la Z-I, el plano de corte de este ensayo era horizontal.

Las presiones normales aplicadas a las probetas fueron de  $1,0 \text{ kp/cm}^2$  para la P-I;  $0,5 \text{ kp/cm}^2$  para la P-II;  $2,0 \text{ kp/cm}^2$  para la P-III y  $4,0 \text{ kp/cm}^2$  para la P-IV.

Los parámetros resistentes calculados para los materiales del emplazamiento Z-III son los siguientes (Figura 3-44):

- $c = 85,9 \text{ kPa}$
- $\phi = 15^\circ$

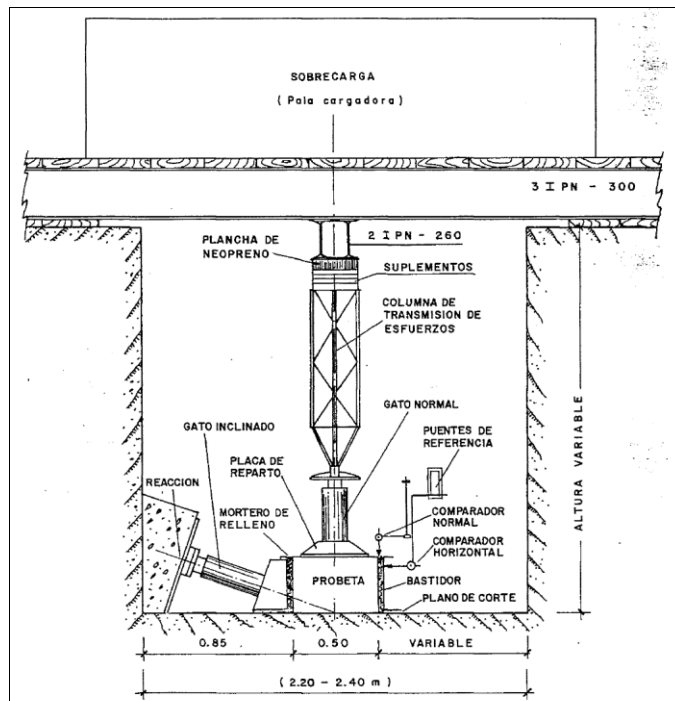


Figura 3-43. Esquema de los ensayos de corte directo *in situ* realizados en las zanjas Z-III, Z-IV, Z-V y Z-VI (CEDEX, 1985b).

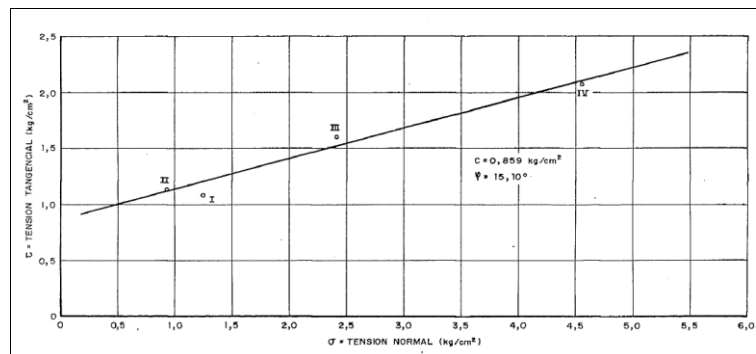


Figura 3-44. Resistencia al corte de los materiales de la Z-III. Se muestra la línea de resistencia intrínseca (CEDEX, 1985b).



### 3.3.4.4.3 Zanja IV

En este emplazamiento, al igual que en los anteriores, se ensayaron cuatro probetas. La situación de las mismas se indica en el esquema de la Figura 3-6.

En la Figura 3-43 se muestra el esquema general de estos ensayos.

Las presiones normales aplicadas a las probetas fueron de 0,5 kp/cm<sup>2</sup> para la P-I; 1,5 kp/cm<sup>2</sup> para la P-II; 2,0 kp/cm<sup>2</sup> para la P-III y 1,0 kp/cm<sup>2</sup> para la P-IV.

Los parámetros resistentes obtenidos para los materiales del emplazamiento Z-IV (Figura 3-45) son los siguientes:

- $c = 23,7 \text{ kPa}$
- $\phi = 10^\circ$

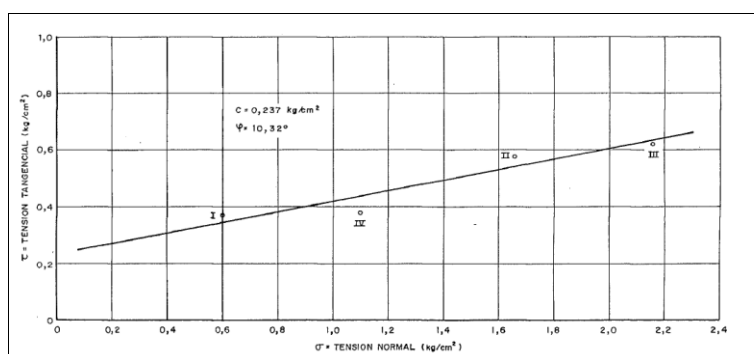


Figura 3-45. Resistencia al corte de los materiales de la Z-IV. Se muestra la línea de resistencia intrínseca (CEDEX, 1985b).

### 3.3.4.5 Ensayos de permeabilidad

#### 3.3.4.5.1 Campaña de sondeos 1982-1983

Dentro de esta campaña de reconocimientos (véase apartado 3.2.1) se realizó un único ensayo Lugeon en esta unidad (Tabla 3-33).

Tabla 3-33. Resultados de los ensayos Lugeon realizados en la Unidad de Almarchal dentro de la campaña de sondeos 1982-1983 (SECEG, 1983b).

Sondeo	Unidad	Tramo (m)	Unidades Lugeon
S-4	Almarchal	58,38 – 108,13	0,16

#### 3.3.4.5.2 Sondeos de la Galería de Tarifa (1995)

En los sondeos cortos realizados durante la excavación de la galería de Tarifa (véase apartado 3.1.3) se realizaron varios ensayos de permeabilidad (Tabla 3-34).

Tabla 3-34. Ensayos de permeabilidad realizados en materiales de la Unidad Almarchal en el interior de la Galería de Tarifa (SECEG, 2001).

Sondeo	Material	Permeabilidad (m/s)
S-1	Arcilloso	$1,1 \cdot 10^{-10}$
S-1	Arcilloso	$0,9 \cdot 10^{-10}$
S-1	Arcilloso	$1,7 \cdot 10^{-10}$
S-1	Arcilloso	$1,1 \cdot 10^{-10}$
S-2	Arcilloso	$4,9 \cdot 10^{-10}$
S-2	Arcilloso	$2,4 \cdot 10^{-10}$
S-2	Arcilloso	$2,5 \cdot 10^{-10}$
S-5	Arcilloso	$0,5 \cdot 10^{-10}$
S-5	Arcilloso	$0,7 \cdot 10^{-10}$
S-5	Arcilloso	$0,5 \cdot 10^{-10}$
S-6	Arcilloso	$0,3 \cdot 10^{-10}$
S-6	Arcilloso	$0,3 \cdot 10^{-10}$
S-6	Arcilloso	$0,3 \cdot 10^{-10}$
S-3	Margoso	$2,0 \cdot 10^{-10}$
S-3	Margoso	$0,8 \cdot 10^{-10}$
S-3	Margoso	$0,7 \cdot 10^{-10}$
S-4	Margoso	$1,7 \cdot 10^{-10}$
S-4	Margoso	$0,9 \cdot 10^{-10}$
S-4	Margoso	$1,0 \cdot 10^{-10}$
S-7	Margoso	$0,7 \cdot 10^{-10}$
S-7	Margoso	$0,6 \cdot 10^{-10}$
S-7	Margoso	$0,6 \cdot 10^{-10}$
S-7	Margoso	$0,5 \cdot 10^{-10}$
S-8	Margoso	$2,9 \cdot 10^{-10}$
S-8	Margoso	$1,5 \cdot 10^{-10}$
S-8	Margoso	$1,8 \cdot 10^{-10}$

#### 3.3.4.6 Ensayos de densidad *in situ* por el método de la arena

Estos ensayos se realizaron en las zanjas experimentales explicadas en el apartado 3.1.1, así como en las excavaciones realizadas en Malabata recogidas en el apartado 3.1.4.

##### 3.3.4.6.1 Zanja I

En esta localización se realizaron seis determinaciones de la densidad *in situ* (Tabla 3-35). Los ensayos se situaron en los puntos indicados en el esquema recogido en la Figura 3-4.

Tabla 3-35. Resultados de los ensayos de densidad *in situ* realizados en el emplazamiento Z-I (CEDEX, 1985a).

Muestra	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	Humedad (%)
D-1	1540	16,5
D-2	1830	15,1
D-3	1700	15,4
D-4	1660	15,5
D-5	1770	17,4
D-6	1760	17,0

##### 3.3.4.6.2 Zanja III

En este punto se realizaron seis determinaciones de la densidad *in situ* (Tabla 3-36). La situación de los ensayos se recoge en la Figura 3-5. Como se ha visto en el apartado 3.1.1.2 los materiales pertenecen a la Unidad de Almarchal.

Tabla 3-36. Resultados de los ensayos de densidad *in situ* realizados en el emplazamiento Z-III (tomados de CEDEX, 1985b)

Muestra	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	Humedad (%)
D-1	1530	18,2
D-2	1740	17,4
D-3	1530	20,2
D-4	1680	19,5
D-5	1770	18,8
D-6	1860	18,7
D-7	1840	17,3
D-8	1650	19,1

#### 3.3.4.6.3 Zanja IV

Como se recoge en la Figura 3-6, en este punto se realizaron ocho determinaciones de la densidad *in situ* mediante el método de la arena (Tabla 3-37). Los materiales ensayados, como se apunta en el apartado 3.1.1.3, pertenecen a la Unidad de Almarchal.

Tabla 3-37. Resultados de los ensayos de densidad *in situ* realizados en el emplazamiento Z-IV (tomados de CEDEX, 1985b)

Muestra	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )	Humedad (%)
D-1	1600	20,1
D-2	1430	19,5
D-3	1410	23,3
D-4	1560	23,4
D-5	1580	23,6
D-6	1560	25,9
D-7	1560	24,4
D-8	1700	23,3

### 3.3.5 Brechas cuaternarias

En la bibliografía no se recoge ningún ensayo realizado en estos materiales.

### 3.3.6 Arenas Bioclásticas

En la bibliografía no se recoge ningún ensayo realizado en estos materiales.

## 3.4 Ensayos de laboratorio

Con muestras extraídas en las diferentes campañas de investigación realizadas se han realizado numerosos ensayos de laboratorio. En este apartado se recogen aquellos de índole geotécnica, realizados en las diferentes unidades geológicas involucradas en el proyecto.

### 3.4.1 Unidad de Algeciras (Beni Ider)

A continuación se muestran los resultados de las diferentes campañas de ensayos de laboratorio realizadas con muestras de la Unidad de Algeciras.

#### 3.4.1.1 LPEE (1982)

Parte de las muestras recogidas en el sondeo Geo.5 (véase apartado 3.2.2) fueron ensayadas en el LPEE (Tabla 3-38).

Tabla 3-38. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras del sondeo Geo.5 (LPEE, 1982).

Prof. (m)	Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	RCS (MPa)	RTI (MPa)	E (MPa)	$v_s$ (m/s)	$v_p$ (m/s)
41	Argilita	21,43	-	1,71	-	-	-
48	Argilita	22,70	9,2	-	574,5	-	-
51	Argilita	23,10	19,0	1,96	828,4	-	-
77	Argilita	22,03	1,23	-	217,7	-	-
77	Argilita	22,93	7,19	1,89	246,5	-	-
77	Argilita	23,00	3,65	-	379,2	-	-
77	Argilita	22,20	-	1,25	-	-	-
77	Argilita	22,77	-	-	-	-	-
54	Arenisca	24,10	23,2	-	-	2080	3342
54	Arenisca	23,75	-	-	-	2100	3060
70	Arenisca	25,30	29,1	-	-	2080	3530
73	Arenisca	23,40	16,6	-	-	1880	2600

$\gamma$ : peso específico; RCS: Resistencia a compresión simple; RTI: Resistencia a tracción indirecta; E: Módulo de deformación;  $v_s$  y  $v_p$ : Velocidad de propagación de ondas S y P

A partir de ensayos de resistencia a compresión triaxiales con control de presión intersticial realizados a muestras arcillosas se obtuvieron los siguientes parámetros resistentes:

- $c' = 300$  kPa
- $c_u = 700$  kPa
- $\phi' = 23^\circ$
- $\phi_u = 17^\circ$

#### 3.4.1.2 SNED (1984)

En este apartado se recogen parte de los ensayos realizados sobre muestras de la Unidad de Algeciras. Estas muestras fueron tomadas en el sondeo Geo.5 (véase apartado 3.2.2).

Tabla 3-39. Ensayos de identificación realizados sobre muestras de los sondeos Geo.5 (SNED, 1984b).

Prof. (m)	Pase tamiz 2 mm (%)	Índice de plasticidad	Hinchamiento libre (%)
20	55	41	17,3
41	34	21	1,9
45	13	16	0,16
67	55	29	7,4
67	48	29	6,3
77	58	29	7,7
77	42	31	6,8
77	35	28	4,8
79	38	30	6,4
79	35	30	5,0

Prof. (m)	Pase tamiz 2 mm (%)	Índice de plasticidad	Hinchamiento libre (%)
82	44	33	8,0
20	51	43	11,3
78	36	27	2,7
30	38	4	6,7

Tabla 3-40. Ensayos edométricos realizados en muestras del Geo.5 (SNED, 1984b).

Prof. (m)	Presión consolidación (MPa)	Presión hinchamiento (MPa)	OCR
67	>2	-	>2
104	2 - 3	0,25	1,35 - 2,0

*OCR: razón de sobreconsolidación*

### 3.4.1.3 CEDEX (1984)

Muestras procedentes de la campaña de sondeos de 1982-83 (véase apartado 3.2.1) se ensayaron en el laboratorio de geotecnia del CEDEX (Tabla 3-41 y Tabla 3-42).

Tabla 3-41. Resultados de los ensayos realizados en el CEDEX sobre muestras de la Unidad de Algeciras (CEDEX, 1983a, 1984).

Sondeo	Prof. (m)	I <sub>D2</sub>	Ctos (%)	I <sub>S50</sub> (MPa)
S-5	27	94,4	5,6	-
S-5	37	-	6,9	-
S-5	37	98,8	12,5	-
S-5	57	97,6	11,5	22,3
S-5	67	98,8	27,7	1,5
S-5	77	98,8	12,4	-
S-5	87	97,8	11,7	-
S-5	97	97,8	8,7	-
S-5	108	-	12,2	-
S-5	123	-	7,0	-
S-5	135	-	8,8	-
S-5	147	99,2	17,2	-
S-5	157	98,2	7,8	-
S-5	166	96,0	8,2	2,9
S-5	177	97,2	7,8	-
S-5	188	-	21,7	7,2
S-5	217	-	5,5	-
S-5	228	94,8	3,1	2,5
S-5	240	98,1	24,9	-
S-5	251	-	-	-
S-5	261	97,6	9,87	3,9
S-5	271	-	18,8	-
S-5	281	98,6	-	2,1
S-5	292	97,8	-	9,5
S-5	301	97,7	-	-
S-5	335	91,9	-	-
S-5	365	98,8	-	6,0
S-5	376	97,9	-	-
S-5	387	97,7	-	3,9
S-5	399	97,8	-	-

*I<sub>D2</sub>: índice de desmoronamiento; Ctos: contenido en carbonatos; I<sub>S50</sub>: índice de carga puntual*

Tabla 3-42. Resultados de los ensayos de resistencia a compresión simple realizados sobre muestras de la Unidad de Algeciras (CEDEX, 1983a, 1984).

Sondeo	Prof. (m)	RCS (MPa)	$\omega$ (%)
S-5	27	37,8	0,9
S-5	57	49,8	1,0
S-5	97	13,4	1,2
S-5	135	31,5	1,5
S-5	217	42,6	1,3
S-5	376	6,8	1,8

RCS: resistencia a compresión simple;  $\omega$ : humedad

#### 3.4.1.4 SNED (1987)

Con muestras del sondeo Geo.3 (véase apartado 3.2.2), realizado sobre materiales de la Unidad de Algeciras se realizaron varios ensayos de resistencia a compresión y tracción. En la Tabla 3-43 se muestran los resultados de estos ensayos recopilados por SNED (1987).

Tabla 3-43. Ensayos de resistencia realizados sobre muestras de los sondeos Geo.3 (SNED, 1987b).

Prof. (m)	Material	RCS (MPa)	RTI (MPa)	$I_s$
81	Argilita	6,26	-	-
82	Argilita	9,15	-	6,5 – 7,8
97	Argilita	17,0	-	17 – 21
149	Argilita	32,7	7,46	31 – 52
157	Argilita	38,4	2,42	13
167	Argilita	28,6	2,62	17 – 21
194	Argilita	31,2	2,52	-

RCS: Resistencia a compresión simple; RTI: Resistencia a tracción indirecta;  $I_s$ : Índice de resistencia a la carga puntual

#### 3.4.1.5 Departamento de Geología - UNIOVI (1987)

En la Tabla 3-44 se muestran los resultados de resistencia a compresión simple con medida del umbral de microfisuración mecánica ejecutados sobre muestras de la Unidad de Algeciras.

Tabla 3-44. Resultados de los ensayos de microfisuración mecánica (UNIOVI, 1987)

Sondeo	Cota (m)	RCS (MPa)	UMM (%)
S5	239,55	41,2	-
S5	97,35	58,6	76

RCS: Resistencia a compresión simple      UMM: Umbral de microfisuración mecánica

#### 3.4.1.6 Segunda campaña de sondeos en Marruecos

En las Tabla 3-45 a Tabla 3-52 se muestran los resultados de los ensayos geotécnicos realizados a las muestras obtenidas de los sondeos de la segunda campaña marroquí (véase apartado 3.2.3).

Tabla 3-45. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-1 (LPEE, 1993).

Prof. (m)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	LL	LP	IP	P. Hinch (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
16	19,4	14,5	116	30	86	-	-	-	0,32	-	-	-
31	19,0	14,5	110	25	85	-	20	19	-	-	-	-
50	20,3	10,8	53	27	26	-	-	-	0,265	-	-	-
65	16,0	14,9	79	31	48	-	-	-	0,3	-	-	-
76	26,6	-	-	-	-	-	-	-	56	-	3476	2393
109	17,6	18,2	60	30	30	-	0	16	-	-	-	-

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; LL: límite líquido; LP: Límite plástico; IP: Índice de plasticidad; c': cohesión efectiva;  $\phi'$ : ángulo de rozamiento interno efectivo; RCS: Resistencia a compresión simple; RTI: Resistencia a la tracción indirecta; Vs: velocidad de propagación de las ondas s; Vp: velocidad de propagación de las ondas p

Tabla 3-46. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-2 (LPEE, 1993).

Prof. (m)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	LL	LP	IP	P. Hinch (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
15	18,3	15	78	27	51	300	Cu=100	-	-	-	-	-
34	19,0	12	70	30	40	350	30	23	-	-	-	-
52	24,5	3,21	-	-	-	-	-	-	4,2	-	1968	1017
79	23,6	2,6	-	-	-	-	-	-	-	1,6	2053	1300
115	18,0	13,4	68	28	40	90	-	-	-	-	-	-

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; LL: límite líquido; LP: Límite plástico; IP: Índice de plasticidad; c': cohesión efectiva;  $\phi'$ : ángulo de rozamiento interno efectivo; RCS: Resistencia a compresión simple; RTI: Resistencia a la tracción indirecta; Vs: velocidad de propagación de las ondas s; Vp: velocidad de propagación de las ondas p

Tabla 3-47. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-3 (LPEE, 1993).

Prof. (m)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	LL	LP	IP	P. Hinch (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
16	19,8	9	12	36	76	-	0	18	-	-	-	-
20	23,7	-	-	-	-	-	-	-	22,8	-	2854	2243
30	22,1	-	-	-	-	-	-	-	22,0	-	22525	1548
38	20,0	2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	19,0	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	20,1	11,5	70	30	40	-	70	23	-	-	-	-
86	18,0	10	79	32	47	-	-	-	-	-	-	-
110	23,7	-	-	-	-	-	-	-	7,74	-	1700	1020
150	24,7	-	-	-	-	-	-	-	12,3	-	1739	1009

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; LL: límite líquido; LP: Límite plástico; IP: Índice de plasticidad; c': cohesión efectiva;  $\phi'$ : ángulo de rozamiento interno efectivo; RCS: Resistencia a compresión simple; RTI: Resistencia a la tracción indirecta; Vs: velocidad de propagación de las ondas s; Vp: velocidad de propagación de las ondas p

Tabla 3-48. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-4 (LPEE, 1993).

Prof. (m)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	LL	LP	IP	P. Hinch (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
28	24,8	4	45	24	21	-	-	-	-	-	-	-
31	25,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	18,0	8	48	26	32	-	-	-	-	-	3220	2240
65	19,8	13	-	-	-	130	30	25	-	-	-	-
75	24,4	2,1	-	-	-	-	-	-	14,9	-	2553	1500
109	24,6	1,9	-	-	-	-	-	-	-	1,1	-	-
124	23,3	7	-	-	-	-	-	-	0,58	-	4103	2286
144	192	13	77	28	49	-	10	25	-	-	-	-

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; LL: límite líquido; LP: Límite plástico; IP: Índice de plasticidad; c': cohesión efectiva;  $\phi'$ : ángulo de rozamiento interno efectivo; RCS: Resistencia a compresión simple; RTI: Resistencia a la tracción indirecta; Vs: velocidad de propagación de las ondas s; Vp: velocidad de propagación de las ondas p

Tabla 3-49. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-5 (LPEE, 1993).

Prof. (m)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	LL	LP	IP	P. Hinch (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
25	22,0	9	39	20	19	20	-	-	0,34	-	-	-

Prof. (m)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	LL	LP	IP	P. Hinch (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
E=100												
45	21,6	7,4	48	26	22	-	70	2	-	-	-	-
54	20,3	11,3	41	21	20	40	-	-	-	-	-	-
105	18,4	13	57	23	34	120	c'=0 c <sub>u</sub> =0	$\phi'$ =25 $\phi_u$ =20	-	-	-	-
115	21,0	10,4	50	26	24	90	15	25	-	-	-	-
150	16,5	21	70	30	40	200	60	20	-	-	-	-
188	23,4	-	-	-	-	-	-	-	14,5	-	2600	1565
220	25,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; LL: Límite líquido; LP: Límite plástico; IP: Índice de plasticidad; c': cohesión efectiva;  $\phi'$ : ángulo de rozamiento interno efectivo; RCS: Resistencia a compresión simple; RTI: Resistencia a la tracción indirecta; Vs: velocidad de propagación de las ondas s; Vp: velocidad de propagación de las ondas p

Tabla 3-50. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-6 (LPEE, 1993).

Prof. (m)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	LL	LP	IP	P. Hinch (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
15	22,0	-	-	-	-	-	-	-	9,6	-	5375	3127
42	19,2	14	52	26	26	-	-	-	0,88 E=300	-	-	-
45	21,8	8	40	22	19	-	-	-	39,5	-	-	-
81	21,7	-	-	-	-	-	-	-	67,8	12,9	6400	2560
115	22,7	-	-	-	-	-	-	-	15,1	4,7	7222	2653
135	17,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5220	2166
150	22,7	-	-	-	-	-	-	-	21,1	-	2364	1529

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; LL: Límite líquido; LP: Límite plástico; IP: Índice de plasticidad; c': cohesión efectiva;  $\phi'$ : ángulo de rozamiento interno efectivo; RCS: Resistencia a compresión simple; RTI: Resistencia a la tracción indirecta; Vs: velocidad de propagación de las ondas s; Vp: velocidad de propagación de las ondas p

Tabla 3-51. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-7 (LPEE, 1993).

Prof. (m)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	LL	LP	IP	P. Hinch (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
14	17,6	8	50	26	24	12	-	-	-	-	-	-
28	19,5	11	55	25	30	-	-	-	0,15	-	-	-
22	19,1	11	60	27	33	300	-	-	-	-	-	-
67	20,0	14	76	29	47	-	c'=30 c <sub>u</sub> =60	$\phi'$ =19 $\phi_u$ =11	-	-	-	-
78	25,8	-	-	-	-	-	-	-	-	3,75	-	-
88	25,1	-	-	-	-	-	-	-	6,1	-	3875	2153

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; LL: límite líquido; LP: Límite plástico; IP: Índice de plasticidad; c': cohesión efectiva;  $\phi'$ : ángulo de rozamiento interno efectivo; RCS: Resistencia a compresión simple; RTI: Resistencia a la tracción indirecta; Vs: velocidad de propagación de las ondas s; Vp: velocidad de propagación de las ondas p

Tabla 3-52. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-10 (LPEE, 1993).

Prof. (m)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	LL	LP	IP	P. Hinch (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Vp (m/s)	Vs (m/s)
11	23,3	-	-	-	-	-	-	-	31,7	7,4	2143	1500
20	22,0	7	41	20	21	80	130	29	-	-	-	-
26	28,5	-	-	-	-	-	-	-	93,2	-	3067	1804
32	17,2	18	-	-	-	-	0	20	-	-	-	-
36	17,7	19	100	33	67	-	c'=30 c <sub>u</sub> =40	$\phi'$ =17 $\phi_u$ =10	-	-	-	-

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; LL: límite líquido; LP: Límite plástico; IP: Índice de plasticidad; c': cohesión efectiva;  $\phi'$ : ángulo de rozamiento interno efectivo; RCS: Resistencia a compresión simple; RTI: Resistencia a la tracción indirecta; Vs: velocidad de propagación de las ondas s; Vp: velocidad de propagación de las ondas p

Los parámetros resistentes (c' y  $\phi$ ) fueron obtenidos a través de ensayos triaxiales TCU.



### 3.4.1.7 Excavación de la Galería de Tarifa (1995)

Las muestras procedentes de la excavación de la galería de Tarifa fueron ensayadas por el laboratorio de Geocontrol (Tabla 3-53 a Tabla 3-55).

Tabla 3-53. Ensayos realizados sobre muestras procedentes de la Galería de Tarifa (Geocontrol, 1995a).

Muestra	Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	E (MPa)	$\nu$	RCS (MPa)	RTI (MPa)
M -68	Calcarenita	25,2	1,43	242,494	0,13	30,25	-
M -69	Calcarenita	25,7	0,96	57,93	-	-	-
M -70	Calcarenita	26,6	0,40	742,63	0,33	76,69	9,074
M -72	Calcarenita	25,8	0,45	1297,154	0,31	-	5,726
M -73	Calcarenita	26,6	0,29	-	-	25,48	-
M -74	Calcarenita	26,5	1,08	-	-	-	6,447
M -75	Calcarenita	26,0	1,71	539,226	0,33	33,55	4,016
M -76	Calcarenita	24,9	1,19	86,364	0,24	9,09	-
M -77	Calcarenita	26,2	1,29	-	-	-	-
M -78	Calcarenita	26,3	1,42	-	-	-	-

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; E: módulo de deformación;  $\nu$ : coeficiente de Poisson; RCS: resistencia a compresión simple; RTI: resistencia a la tracción indirecta.

Tabla 3-54. Ensayos de resistencia realizados sobre muestras de la Galería de Tarifa pertenecientes al flysch margo-arenisco micáceo (Geocontrol, 1995a).

Muestra	Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	E (MPa)	$\nu$	RCS (MPa)	RTI (MPa)
M-3 (1)	Limolita	24,1	4,37	5613	0,14	23,9	-
M-4	Limolita	24,2	3,55	8392	0,11	17,6	-
M-4 (1)	Limolita	23,8	3,55	-	-	-	1,8
M-5	Arenisca	23,7	2,26	-	-	-	2,8
M-5 (1)	Arenisca	24,3	2,32	7077	0,24	25,1	-
M-6 (1)	Arenisca	24,8	1,55	9650	0,29	36,4	3,2
M-6 (2)	Arenisca	24,2	1,55	-	-	-	4,7
M-6 (3)	Arenisca	24,2	1,3	-	-	-	5,1
M-7	Arenisca	24,6	1,20	-	-	-	4,5
M-9A	Marga	24,0	1,84	-	-	-	1,9
M-9A (1)	Marga	24,5	1,84	6322	0,2	19,6	-
M-10A	Marga	23,8	3,55	5811	0,33	13,5	-
M-13A	Marga	23,6	3,42	-	-	-	2,6
M-13A (2)	Marga	24,6	2,83	5539	0,18	12,8	-
M-13B (2)	Marga	24,2	2,23	-	-	-	2,6
M-14A (1)	Limolita	24,0	1,28	-	-	-	1,9
M-15A	Argilita	24,2	-	-	-	-	1
M-15B	Arenisca	25,5	1,44	23612	0,16	-	2,3
M-16B (1)	Limolita	26,1	1,55	14645	0,16	27	-
M-17A	Marga	24,3	2,16	5045	0,2	16,3	-
M-17B (2)	Marga	24,2	2,35	-	-	-	2,8
M-17C	Marga	24,3	2,08	3287	0,27	15,8	-
M-18A(2)	Marga	23,6	2	-	-	-	-
M-18B	Marga	23,9	2,33	-	-	-	3,1
M-18C	Marga	24,1	3,51	6909	0,29	-	6,4
M-19A (1)	Limolita	25,9	2,04	9396	0,26	32,3	-
M-19B (1)	Limolita	25,6	3,4	-	-	-	-
M-20A (1)	Limolita	25,4	2,23	22328	0,2	-	4
M-20B (3)	Limolita	25,9	2,15	-	-	-	4,9
M-21 (2)	Limolita	25,7	0,67	-	-	-	4,3
M-22 (2)	Limolita	25,6	0,99	-	-	-	3,8
M-23B	Arenisca	26,2	1,63	9501	0,25	34,4	-
M-23C	Limolita	26,2	3,8	-	-	-	-
M-24A	Arenisca	26,1	1,35	6885	0,27	31,2	-
M-24A (2)	Arenisca	26,2	1,50	-	-	-	5,7
M-24B	Arenisca	26,6	1,62	-	-	-	6,7
M-25	Argilita	20,7	3,51	-	-	-	0,9

Muestra	Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	E (MPa)	$\nu$	RCS (MPa)	RTI (MPa)
M-26A	Limolita	25,6	2,31	224	0,24	29	-
M-30(2)	Marga	25,4	3,49	10515	0,28	27	1,9
M-24A (2)	Arenisca	26,2	1,50	-	-	-	5,7
M-24B	Arenisca	26,6	1,62	-	-	-	6,7
M-25	Argilita	20,7	3,51	-	-	-	0,9

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; E: módulo de deformación;  $\nu$ : coeficiente de Poisson; RCS: resistencia a compresión simple; RTI: resistencia a la tracción indirecta.

Tabla 3-55. Ensayos de resistencia realizados sobre muestras de la Galería de Tarifa pertenecientes a la sucesión de pelitas rojas (Geocontrol, 1995a).

Muestra	Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	E (MPa)	$\nu$	RTI (MPa)
M-31 (4)	Limolita	2,56	3,36	8958	0,49	-
M-32 (2)	Limolita	2,57	3,30	7733	0,27	-
M-33 (1)	Limolita	2,57	3,28	7691	0,25	1
M-37B (1)	Marga	2,45	3,28	-	-	1,6
M-38 (5)	Marga	2,55	2,87	-	-	3,3
M-39 (2)	Arenisca	2,47	5,06	2181	0,45	-
M-41 (3)	Arenisca	2,38	3,63	-	-	1,1
M-41(1)	Arenisca	2,51	4,14	2355	0,05	-
M-41(2)	Arenisca	2,38	3,83	-	-	1
M-42	Arenisca	2,63	5,72	5725	0,3	-
M-46 (1)	Pelita roja	2,41	3,44	-	-	0,8
M-46 (2)	Pelita roja	2,33	3,79	-	-	1
M-47 (1)	Arenisca	2,41	3,50	-	-	1,3
M-47 (2)	Arenisca	2,44	2,36	-	-	1,1
M-47 (4)	Arenisca	2,50	1,82	-	-	1,8
M-47 (5)	Arenisca	2,41	2,61	-	-	1,4
M-47 (6)	Arenisca	2,39	3,05	-	-	1
M-47(3)	Arenisca	2,40	4,28	-	-	1
M-48 (1)	Pelita roja	2,26	5,98	-	-	1,1
M-48 (2)	Pelita roja	2,28	5,53	-	-	1,6
M-50	Pelita roja	2,50	6,05	865	-	-
M-54	Calcarenita	2,47	3,60	-	-	1,2
M-54 (1)	Calcarenita	2,52	5,10	9176	-	-
M-54 (2)	Calcarenita	2,52	4,91	4252	0,15	-
M-55	Calcarenita	2,52	2,26	-	-	2,6
M-56 (1)	Calcarenita	2,50	6,14	2776	0,2	-
M-58	Calcarenita	2,54	1,92	2187	0,22	-
M-58 (1)	Calcarenita	2,48	3,70	-	-	3
M-58 (2)	Calcarenita	2,50	2,55	-	-	2,2
M-58 (3)	Calcarenita	2,44	3,30	-	-	1,6
M-59	Calcarenita	2,54	5,17	4665	0,29	-
M-59 (1)	Calcarenita	2,36	3,81	-	-	1,2
M-59 (2)	Calcarenita	2,43	3,80	-	-	2,2
M-60	Pelita roja	2,36	4,65	-	-	1,6
M-60 (1)	Pelita roja	2,40	7,97	570	0,25	-
M-62	Pelita roja	2,39	7,83	434	0,1	-
M-62	Pelita roja	2,39	2,80	-	-	1,3
M-65 (1)	Pelita roja	2,37	7,91	752	0,15	-
M-66	Calcarenita	2,59	2,94	5857	-	-
M-66 (1)	Caliza	2,68	0,11	-	-	9,1
M-66(2)	Caliza	2,67	0,11	-	-	10
M-67 (1)	Calcarenita	2,62	0,96	-	-	4,6
M-67 (2)	Calcarenita	2,63	0,72	-	-	4,7

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; E: módulo de deformación;  $\nu$ : coeficiente de Poisson; RCS: resistencia a compresión simple; RTI: resistencia a la tracción indirecta.

Además de los ensayos sobre roca matriz, se han realizado 32 ensayos de resistencia al corte sobre juntas (Tabla 3-56).

Tabla 3-56. Ensayos de resistencia al corte en discontinuidades realizados en muestras de la Galería de Tarifa (Geocontrol, 1995a).

Zona	Material	Tipo de junta	JRC	Número de ensayos	c (MPa)	$\phi$ pico (°)	$\phi$ residual (°)
FMAM	Marga	Pulida- Ondulada	2-4	4	0,65	14	13
FMAM	Marga	Lisa-escalonada	8-10	3	0,23	29	26
FMAM	Marga	Lisa-plana	2-4	4	0,22	30	30
FMAM	Limolita margosa	Pulida- Ondulada	2-4	2	0,02	34	29
FMAM	Limolita margosa	Rugosa-ondulada	12-14	4	0,66	34	26
FMAM	Arenisca	Lisa-ondulada	2-4	3	0,11	38	33
PR	Pelita roja	Lisa-plana	0-2	3	0,15	21	21
PR	Pelita roja	Pulida-ondulada	2-4	4	0,09	24	24

JRC: *joint roughness coefficient*; c: cohesión;  $\phi$ : ángulo de rozamiento interno; FMAM: Flysch margo-arenisco micáceo; PR: Pelitas rojas.

### 3.4.1.8 Excavación del Pozo de Malabata (1985)

El número de ensayos realizados sobre muestras procedentes del Pozo de Malabata (véase apartado 3.1.4) es muy amplio (INGEMA, 1997):

- 215 análisis granulométricos por tamizado
- 186 análisis granulométricos por sedimentación
- 216 límites de Atterberg
- 286 determinaciones del peso específico y la humedad
- 4 ensayos edométricos
- 5 ensayos de resistencia a compresión triaxiales con control de la presión intersticial
- 5 ensayos de hinchamiento
- 32 análisis químicos
- 5 análisis mineralógicos
- 45 ensayos de resistencia a compresión simple con humedad natural
- 25 ensayos de resistencia a compresión simple en saturación
- 32 medidas de la velocidad de propagación de ondas
- 498 ensayos de resistencia a carga puntual
- 17 ensayos de abrasividad

En la Tabla 3-57 se recogen los parámetros más representativos de estos ensayos ya que la información completa no está accesible y solamente se cuenta con un resumen de los mismos.

Tabla 3-57. Parámetros representativos de los ensayos de laboratorio realizados en el Pozo de Malabata (INGEMA, 1997).

Ensayo	Parámetro	Material	Media	Máximo	Mínimo
Estado	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Suelo	-	24	20
	$\omega$ (%)		-	15	9
Granulometría	> 2 mm (%)	Suelo		100	90
	< 0,08 mm (%)			100	50
Plasticidad	LL	Suelo	91	100	45
	IP		40	70	24
Edómetro	C <sub>c</sub>	Suelo	-	0,06	0,013
	Pres. consolidación		-	5	2
	C <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> /s)		-	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>
Hinchamiento	Presión	Suelo		6	1,5
Corte directo					
		Suelo			
	c <sub>residual</sub> (kPa)		0	0	0
	$\phi$ <sub>residual</sub> (°)		16	17	15

Ensayo	Parámetro	Material	Media	Máximo	Mínimo
Compresión simple	RCS (MPa)	Caliza masiva	40	97	8
		Calcarenita	48	127	1,2
		Caliza margosa	24	62	4
Compresión puntual	Is <sub>50</sub> (MPa)	Calcarenita	5,5	-	-
		Arenisca	2,5	-	-
		Marga	0,45	-	-
Estado en rocas	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	C. masiva	25,1	-	-
		C. margosa	23,4	-	-
	$\omega$ (%)	-		6,5	0,6
Abrasividad	Índice cerchar	-	0,17	0,3	0,1

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; LL: límite líquido; IP: índice de plasticidad; Cc: coeficiente de compresibilidad; Cv: coeficiente de consolidación;  $c_{residual}$ : cohesión residual;  $\phi_{residual}$ : ángulo de rozamiento interno residual; RCS: resistencia a compresión simple; Is<sub>50</sub>: índice de resistencia a la carga puntual.

### 3.4.2 Unidad de Bolonia (Tala Lakrah)

Las muestras tomadas en las diferentes actuaciones realizadas en materiales pertenecientes a la Unidad de Bolonia han sido ensayadas en diferentes laboratorios a lo largo del desarrollo del proyecto. En los siguientes apartados se recogen los resultados de estas campañas de ensayo.

#### 3.4.2.1 CEDEX (1984)

A partir de las muestras recogidas en la primera campaña de sondeos (véase apartado 3.2.1) se realizó una serie de ensayos de laboratorio en el CEDEX. Los resultados de los ensayos correspondientes a la Unidad de Bolonia se muestran en la Tabla 3-58 y Tabla 3-59.

Tabla 3-58. Resultados de los ensayos de estado e identificación (CEDEX, 1983a, 1984).

Son.	Prof. (m)	$\omega$ (%)	LL	LP	IP	SeHuDes	Ctos (%)	Stos (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Índice hinch. (MPa)	I. hinch. Lambe (MPa)
S-1	276	12,1	56	23	33	-	1,3	-	-	-	265
S-1	285	12,4	57	22	35	-	1,1	-	-	-	226
S-1	285	13,1	61	27	34	-	0	-	-	-	-
S-1	298	13,7	62	29	34	-	0	-	-	-	371
S-1	301	12,2	57	26	31	-	0	-	-	-	319
S-2	45	18,9	82,6	35,0	47,6	-	1,3	0	14,7	0,255	0,159
S-2	56	14,5	54,0	25,8	28,2	9,3	1,3	-	16,4	0,159	0,086
S-2	58	-	50,0	21,4	28,6	-	1,6	-	-	0,153	-
S-2	56	9,0	41,2	20,4	20,8	61,2	1,2	0	17,5	-	0,048
S-2	75	13,4	86,3	30,4	55,9	0,6	1,2	0,082	15,2	0,180	0,124
S-2	84	18,0	53,2	27,8	25,4	7,7	2,1	0,082	-	-	-
S-2	84	-	49,3	23,3	26,0	-	1,3	-	-	-	-
S-2	94	10,1	48,3	23,9	24,4	5,4	0,6	0	16,8	-	0,105
S-2	94	-	48,7	22,4	26,3	-	-	-	-	-	-
S-2	104	-	39,4	19,3	20,1	-	2,1	0	-	-	-
S-2	104	5,9	-	-	-	-	6,7	-	-	-	-
S-2	124	7,9	-	-	-	3,4	1,3	-	-	-	-
S-2	135	7,9	40,0	21,5	18,5	-	1,3	-	-	-	-
S-2	144	6,7	45,9	22,2	23,7	-	1,1	-	-	-	-
S-3	24	13,0	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-
S-3	35	17,4	79,4	31,5	47,9	-	0	-	-	0,489	-
S-3	44	17,4	82,8	30,4	52,4	-	2,0	-	-	-	-
S-3	55	17,4	97,2	32,1	65,1	-	1,0	-	-	-	-
S-3	65	13,3	74,4	32,2	42,2	-	0	-	-	0,122	-

Son.	Prof. (m)	$\omega$ (%)	LL	LP	IP	SeHuDes	Ctos (%)	Stos (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Índice hinch. (MPa)	Í. hinch. Lambe (MPa)
S-3	74	9,9	85,8	28,4	57,4	-	4,3	-	-	0,438	-
S-3	84	18,6	81,0	31,6	49,4	-	1,0	-	-	-	-
S-3	135	11,2	79,2	26,0	53,2	-	7,0	-	-	-	-
S-3	155	10,1	51,3	24,7	26,6	-	0,7	-	-	0,172	-
S-3	167	17,5	72,1	28,6	43,5	-	1,3	-	-	0,232	-
S-3	181	11,1	52,2	21,0	31,2	-	0,7	-	-	-	-
S-3	191	10,1	83,6	28,4	55,2	-	0	-	-	-	-

$\omega$ : humedad; LL: límite líquido; LP: Límite plástico; IP: índice de plasticidad; Ctos: contenido en carbonatos; Stos: contenido en sulfatos;  $\gamma_d$ : peso específico seco.

Tabla 3-59. Resultados de los ensayos de resistencia (CEDEX, 1983a, 1984)

Sondeo	Prof. (m)	RCS (MPa)	$\omega$ (%)	Is <sub>50</sub> (MPa)
S-2	135	13,7	1,9	-
S-2	144	22,5	3,1	-
S-2	164	22,0	3,0	-
S-2	175	21,2	3,9	-
S-2	175	18,6	3,5	-
S-2	194	18,2	3,1	-
S-2	205	26,8	1,2	-
S-2	224	36,4	0,3	-
S-3	65	85,9	0,6	57
S-3	84	94,6	0,2	-
S-3	105	51,1	0,5	8,5
S-3	125	-	-	34,1
S-3	135	-	-	9,7
S-3	145	-	-	12,9

RCS: Resistencia a compresión simple;  $\omega$ : humedad; Is<sub>50</sub>: índice de resistencia a la carga puntual

### 3.4.2.2 Departamento de Geología - UNIOVI (1987)

En Tabla 3-60 se muestran los resultados de resistencia a compresión simple con medida del umbral de microfisuración mecánica realizados sobre muestras de la Unidad de Bolonia.

Tabla 3-60. Resultados de los ensayos de microfisuración mecánica (UNIOVI, 1987).

Sondeo	Cota (m)	RCS (MPa)	UMM (%)
S1	277	84,8	-
S1	289	122,3	75
S2	82	84,4	-
S3	132	71,8	-
S3	138	87,9	85
S3	169	124,9	61

RCS: Resistencia a compresión simple; UMM: Umbral de microfisuración mecánica

### 3.4.2.3 CEDEX (1987)

Las muestras recogidas en las zanjas experimentales Z-V y Z-VI, realizadas sobre materiales de la Unidad de Bolonia, fueron ensayadas en el laboratorio de Geotecnia del CEDEX (Tabla 3-61).

Tabla 3-61. Resultados de los ensayos de estado e identificación (CEDEX, 1987b).

Zanja	Bloque	$\omega$ (%)	LL	LP	IP	Ctos (%)	Stos (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Í. hinch. Lambe 2h (MPa)	Í. hinch. Lambe 24h (MPa)
Z-V	1	10,8 10,3	39,8	23,3	16,5	no	-	21,3 21,5	1,44 0,82	084
	3	9,6 9,8	37,2	20,8	16,4	-	-	21,9 21,7	0,55 0,68	0,69
	4	13,6 13,6 13,3 13,5	43,3	22,9	20,4	1,4	no	19,0 19,5 19,7 20,1	0,60 1,05	1,65
	5	24,1	41,2	24,9	16,3	no	-	19,1	0,86 0,92	0,90
	1	19,6 19,2 19,2 20,0	49,7	28,9	20,8	no	-	18,4 18,2 17,8 18,2	2,05 1,83	1,72
Z-VI	2	19,8 19,5 19,4 19,5	49,0	26,7	22,3	0,9	no	17,7 17,9 18,1 17,8	1,38 1,27	1,10
	3	20,7 21,4 20,3 18,5	54,7	30,0	24,7	no	no	17,6 17,5 17,7 18,2	2,02 1,64	1,64
	6	18,1 17,9 18,9 17,7	53,7	27,7	26,0	no	no	18,4 18,5 18,0 18,8	1,70 1,96	1,90

$\omega$ : humedad; LL: límite líquido; LP: Límite plástico; IP: índice de plasticidad; Ctos: contenido en carbonatos; Stos: contenido en sulfatos;  $\gamma_d$ : peso específico seco.

### 3.4.3 Unidad de Facinas (Mellousa)

De la Unidad Facinas se ensayaron muestras (Tabla 3-62 y Tabla 3-63) procedentes del sondeo Geo.6 (véase apartado 3.2.2). Los ensayos realizados han consistido en (LPEE, 1987; Mesquine, 1987; SNED, 1987a):

- 4 determinaciones de la humedad natural
- 4 medidas del peso específico aparente
- 11 límites de Atterberg
- 12 granulometrías
- 2 ensayos de resistencia a compresión triaxial TCU
- 5 ensayos edométricos.

Tabla 3-62. Resultados de los ensayos de identificación realizados a muestras del sondeo Geo.6 (LPEE, 1987).

Prof. (m)	$\omega$ (%)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	LL	LP	IP	Granulometría (%)	
						>2 mm	<0,08 mm
43	-	-	75	27	48	4	95
44	7	19,2	65	21	44	0	98
50	6	19,9	72	28	44	1	95
64	6	20,2	52	23	29	12	77
74	-	-	53	23	30	4	91
97	-	-	63	20	43	5	92
105	-	-	62	28	34	0	99
114	-	-	-	-	-	2	96

Prof. (m)	$\omega$ (%)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	LL	LP	IP	Granulometría (%)	
						>2 mm	<0,08 mm
129	-	-	53	24	29	0	100
147	5	19,8	48	23	25	2	91
170	-	-	57	24	33	7	84
175	-	-	50	23	27	15	73

$\gamma$ : peso específico;  $\omega$ : humedad; LL: límite líquido; LP: límite plástico; IP: índice de plasticidad

Tabla 3-63. Ensayos edométricos realizados a muestras del sondeo Geo.6 (LPÉE, 1987).

Prof. (m)	$I_c$	$I_H$	$P_H$ (MPa)
43	0,63	0,236	0,57
44	0,22	0,208	0,65
50	0,585	0,162	0,65
64	0,212	0,126	0,45
147	0,165	0,07	0,80

$I_c$ : Índice de compresibilidad;  $I_H$ : Índice de hinchamiento;  $P_H$ : Presión de hinchamiento

A partir de los ensayos de resistencia a compresión triaxiales, suponiendo un criterio de rotura tipo Mohr-Coulomb, se han determinado los siguientes parámetros resistentes:

- $c' = 60$  kPa
- $\phi' = 19^\circ$
- $c_u = 70$  kPa
- $\phi_u = 8^\circ$

### 3.4.4 Unidad de Almarchal (Tanger)

En los siguientes apartados se muestran los datos de las diferentes campañas de ensayos de laboratorio realizados sobre muestras pertenecientes a la Unidad de Almarchal.

#### 3.4.4.1 CEDEX (1984)

A partir de las muestras recogidas en la primera campaña de sondeos (véase apartado 3.2.1) se realizó una serie de ensayos de laboratorio en el CEDEX (Tabla 3-64, Tabla 3-65 y Tabla 3-66).

Tabla 3-64. Resultados de los ensayos de identificación (CEDEX, 1983a, 1984).

Sondeo	Prof. (m)	$\omega$ (%)	LL	LP	IP	Ctos (%)	Stos (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Índice hinch. (MPa)	Hinch. Lambe (MPa)
S-1	82	11,6	81,6	29,8	51,8	7,2	0,128	15,5	0,148	0,121
S-1	91	13,5	63,9	21,6	42,3	10,7	0,102	16,9	0,215	0,134
S-1	101	14,7	74,6	30,5	44,1	10,2	0,092	15,6	0,207	0,100
S-1	110	13,4	92,1	30,5	61,6	3,1	0,040	16,8	0,258	0,172
S-1	120	18,7	132,5	30,0	102,5	1,5	0,062	-	0,282	-
S-1	139	14,8	108,1	31,1	77,0	-	-	14,8	0,164	0,125
S-1	153	22,8	92,4	32,1	60,3	3,9	0,112	14,1	-	0,194
S-1	164	11,6	67,5	17,9	49,6	18,1	0,090	15,4	-	0,145
S-1	174	22,3	146,0	27,7	118,3	6,4	-	-	0,296	-
S-1	184	17,4	99,5	31,2	68,3	2,8	-	-	0,296	-
S-1	194	23,6	83,1	28,9	54,2	6,8	-	15,3	0,121	0,089

Sondeo	Prof. (m)	$\omega$ (%)	LL	LP	IP	Ctos (%)	Stos (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Índice hinch. (MPa)	Hinch. Lambe (MPa)
S-1	204	15,6	64,5	29,9	34,6	5,4	0,126	15,4	0,134	0,156
S-1	214	19,1	110,4	32,4	78,0	4,4	0	14,8	0,264	0,113
S-1	235	15,1	73	24	49	4,6	-	-	-	-
S-1	249	15,7	90	25	65	3,5	-	-	-	-
S-1	265	14,5	69	21	48	4,2	-	-	-	-
S-2	14	-	52,4	26,7	25,7	2,8	-	-	-	-
S-2	25	-	84,2	30,1	54,1	-	0	-	-	-
S-3	201	14,6	65,2	29,4	35,8	0	-	-	0,164	-
S-3	219	16,2	91,0	32,5	58,5	0,6	-	-	-	-
S-3	229	18,4	89,4	32,3	57,1	1,6	-	-	0,315	-
S-4	10	20,6	81,6	29,8	51,8	3,3	-	-	0,164	-
S-4	19	11,6	46,8	21,5	25,3	0,7	-	-	0,126	-
S-4	29	14,0	51,0	23,8	27,2	0,9	-	16,5	-	0,086
S-4	40	16,7	57,3	24,9	32,4	0,8	-	16,6	-	0,126
S-4	50	15,9	51,0	24,2	26,8	0	-	16,6	-	0,070
S-4	59	12,9	48,5	22,4	26,1	1,3	-	16,7	0,039	0,097
S-4	70	13,5	46,5	22,5	24,0	0	-	17,3	0,040	0,121
S-4	80	15,2	51,4	23,3	28,1	0,7	-	16,0	-	0,090
S-4	90	13,2	54,1	22,2	31,9	1,8	-	17,5	0,083	0,094
S-4	100	12,9	62,2	23,8	38,4	2,9	-	-	0,269	-
S-7	13	17,9	70	24	47	7,4	-	-	-	291
S-7	23	13,2	67	20	47	7,3	-	-	-	202
S-7	33	15,8	71	21	50	0,4	-	-	-	189
S-7	44	11,7	74	22	52	3,0	-	-	-	205
S-7	54	7,5	64	19	45	8,1	-	-	-	55
S-7	64	12,7	65	19	46	1,2	-	-	-	127
S-7	75	16,5	90	21	68	2,7	-	-	-	99
S-7	84	14,5	71	21	50	5,0	-	-	-	153
S-7	95	13,5	86	21	65	2,7	-	-	-	176
S-7	105	16,0	67	19	48	9,3	-	-	-	64
S-7	115	9,8	51	18	33	6,1	-	-	-	-
S-7	125	17,4	65	19	46	8,7	-	-	-	78
S-7	135	7,4	39	17	22	1,8	-	-	-	132
S-7	146	13,3	93	19	74	16,7	-	-	-	68
S-7	28	10,8	66	14	52	8,6	-	-	-	-
S-7	28	-	-	-	-	8,0	-	-	-	39
S-9	10	46,8	47	25	22	-	0,09	-	-	238
S-9	20	58,3	58	25	33	-	0,06	-	-	342
S-9	30	90,1	90	28	62	-	,06	-	-	265
S-9	40	99,4	99	27	72	-	0,04	-	-	293
S-9	51	81,5	82	30	52	-	0,08	-	-	319

$\omega$ : humedad; LL: límite líquido; LP: límite plástico; IP: índice de plasticidad; Ctos: contenido en carbonatos; Stos: contenido en sulfatos;  $\gamma_d$ : peso específico seco.

Tabla 3-65. Resultados de los ensayos de desmoronamiento SEHUDES (CEDEX, 1983a, 1984).

Sondeo	Profundidad (m)	$I_{D2}$
S-1	82	20,7
S-1	91	13,1
S-1	101	4,3
S-1	110	32,0

$ID2$ : Índice de desmoronamiento con 2 ciclos.

Tabla 3-66. Resultados de los ensayos de resistencia (CEDEX, 1983a, 1984).

Sondeo	RCS (MPa)	$\varepsilon$ (%)	$I_{S50}$ (MPa)
S-1	80	0,3	-
S-7	-	-	1,5
S-7	-	-	3,2

RCS: resistencia a compresión simple;  $\varepsilon$ : deformación en rotura,  $I_{S50}$ : Índice de carga puntual.



## 3.4.4.2 CEDEX (1986)

Muestras provenientes de las zanjas experimentales Z-I, Z-II, Z-III y Z-IV fueron ensayadas en el laboratorio de geotecnia del CEDEX (Tabla 3-67, Tabla 3-68 y Tabla 3-69).

Tabla 3-67. Resultados de los ensayos de identificación (CEDEX, 1986).

Zanja	Bloque	$\omega$ (%)	LL	LP	IP	Ctos (%)	Stos (%)	m.o. (%)
Z-I	1		41,8	22,4	19,4	No	0,08	0,6
	2	14,3-14,5	44,6	22,2	22,4	No	0,12	1,2
	3	15,8-14,7	44,4	22,4	22,0	No	0,10	1,1
	4	15,4-15,5	43,2	23,7	19,5	No	0,14	1,9
Z-II	1	-	-	-	-	4,3	-	0,8
	2	16,1	51,1	26,4	27,7	1,2	0,51	-
	3	13,0	44,7	22,4	22,3	0,1	-	-
	4	15,4	57,4	25,1	32,3	5,1	0,09	-
	5	-	48,3	23,2	25,1	-	-	-
Z-II	6	-	45,8	22,1	23,7	0,3	0,20	-
	7	17,3	54,7	24,2	30,5	3,7	-	-
	8	14,4	43,9	21,0	22,9	No	0,16	-
Z-III	1	13,1	57,7	24,5	33,2	4,8	0,26	-
	2	14,9-12,3	49,4	23,8	25,6	-	-	0,6
	3	14,0-14,6	44,1	26,4	17,7	4,1	-	-
	4	14,6-14,7	42,9	24,8	18,1	4,9	-	0,7
	5	15,7-14,9	45,4	25,6	19,8	4,1	0,20	-
	6	12,6-14,9	-	-	-	-	-	-
	7	20,3	64,8	37,3	27,5	No	-	-
Z-IV	3	-	52,8	29,5	23,3	-	-	-
	4	-	53,7	30,0	23,7	-	-	-
	5	18,0	-	-	-	-	-	-
	6	-	57,9	32,2	25,7	0,1	0,09	-
	7	21,8	58,5	31,1	27,4	0,1	-	-
	8	-	55,2	29,2	26,0	0,1	-	-

$\omega$ : humedad; LL: límite líquido; LP: límite plástico; IP: índice de plasticidad; Ctos: Contenido en carbonatos; Stos: Contenido en sulfatos; m.o.: Contenido en materia orgánica

Tabla 3-68. Resultados de los ensayos de hinchamiento (CEDEX, 1986).

Zanja	Bloque	Presión de Hinchamiento (kPa)	Hinchamiento libre (%)
Z-I	1	180	4,58
Z-I	2	300	6,25
Z-I	3	100	6,00
Z-I	4	100	3,83
Z-II	6	140	4,58
Z-III	2	100	-
Z-IV	3	260	5,17
Z-IV	4	-	1,50

Tabla 3-69. Resultados de los ensayos de resistencia al corte directo (CEDEX, 1986).

Zanja	Bloque	$C_u$ (MPa)
Z-I	1	0,18
	2	0,13
	3	0,26
	4	0,18
	6	0,42
	8	0,20
Z-IV	3	0,16
	4	0,05

Zanja	Bloque	$C_u$ (MPa)
	6	0,16
	7	0,19
	8	0,20

$C_u$ : resistencia al corte sin drenaje

#### 3.4.4.3 UNIOVI (1987)

En 1987, el Grupo de Petrofísica del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo ensayó diferentes muestras rocosas provenientes de la campaña de sondeos de 1982-83 (véase apartado 3.2.1) a fin de estudiar su resistencia y su umbral de microfisuración mecánica (Tabla 3-70).

El umbral de microfisuración mecánica se corresponde con el porcentaje de la resistencia a compresión simple a partir del cual en la roca comienzan a producirse microroturas. Estas microroturas producen una emisión acústica que puede ser detectada con los receptores adecuados.

Tabla 3-70. Resultados de los ensayos de microfisuración mecánica (UNIOVI, 1987).

Sondeo	Cota (m)	RCS (MPa)	UMM (%)
S-1	106	63,7	80
S-1	197	80,5	-
S-1	255	119,8	65
S-3	38	141,1	82
S-3	210	151,3	88
S-7	32	50,9	95
S-7	59	5,7	76
S-7	99	94,1	90
S-7	111	12,4	63
S-7	130	44,5	88
S-7	141	81,1	86

RCS: Resistencia a compresión simple; UMM: Umbral de microfisuración mecánica

#### 3.4.4.4 Pozo de Bolonia (1993)

Las muestras tomadas durante la excavación del pozo de Bolonia (véase apartado 3.1.2.7) fueron ensayadas por Geocisa (1993). En la Tabla 3-71, Tabla 3-72 y Tabla 3-73 se muestran los resultados de esta campaña de ensayos.

Tabla 3-71. Ensayos de identificación realizados en muestras del Pozo de Bolonia (Geocisa, 1993).

Prof. (m)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	Granulometría		Límites			Presión hinchamiento (kPa)
			<0,06	>0,02	LL	LP	IP	
36,4	17,5	16,90	83,4	14,1	92	29	63	90
39,0	16,7	16,00	93,7	2,2	76	31,4	5	100
44,6	17,1	17,50	87,8	3	67	28	39	240

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; LL: Límite líquido; LP: Límite plástico; IP: Índice de plasticidad.

A partir de la muestra obtenida a 39 m se obtuvieron los siguientes parámetros resistentes mediante ensayos de resistencia triaxiales (Geocisa, 1993):

- $c' = 5,4$  kPa
- $\phi' = 22^\circ$

Se realizaron 37 ensayos de resistencia al corte directo con diferentes orientaciones de las muestras respecto a la laminación. En la Figura 3-46 se muestran estas direcciones. Los resultados de estos ensayos aparecen en la Tabla 3-72.

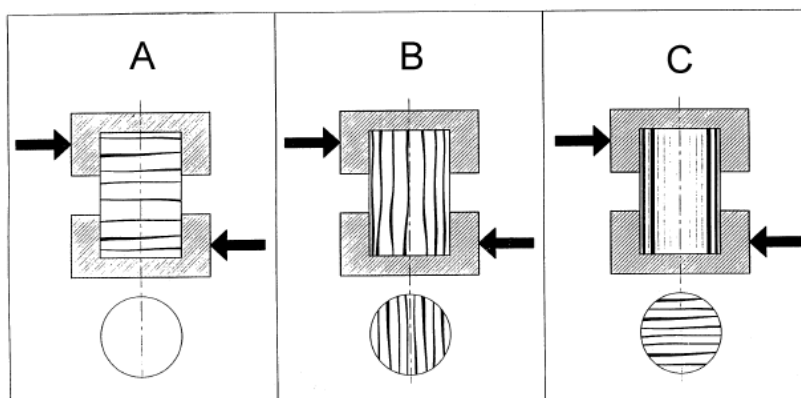


Figura 3-46. Diferentes orientaciones de las muestras en los ensayos de resistencia al corte directo. A: Paralela. B: Transversal. C: Perpendicular. (SECEG, 2001).

Tabla 3-72. Ensayos de resistencia al corte directo en muestras del Pozo de Bolonia (Geocisa, 1993).

Prof. (m)	Tallado	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	$c'$ (kPa)	$\phi$ (°)
36,4	Perpendicular	1,1	16,00	0,32	42,76
39,0	Paralelo	17,1	17,40	0,43	23,02
39,0	Transversal	17,3	17,00	0,76	33,80
39,0	Perpendicular	18,6	16,40	1,03	40,36
39,0	Transversal	17,8	15,10	1,20	36,15
39,0	Paralelo	17,7	14,30	2,35	17,93
44,6	Perpendicular	17,7	14,20	1,59	38,50
44,6	Paralelo	17,5	15,10	0,57	26,05
44,6	Perpendicular	17,4	15,40	0	35,26
44,6	Paralelo	17,7	15,70	1,50	17,69
49,0	Transversal	18,1	14,70	1,12	35,37
49,0	Paralelo	18,0	14,50	0,51	18,16
49,0	Perpendicular	17,5	14,50	1,26	35,07
49,0	Paralelo	17,4	14,80	1,29	17,04
52,0	Paralelo	17,7	1,20	1,33	20,81
52,0	Transversal	17,7	11,50	1,09	34,29
52,0	Paralelo	17,4	16,80	0,98	28,94
52,0	Perpendicular	17,6	16,80	2,63	36,64
52,0	Paralelo	17,4	16,90	0,83	32,70
52,0	Perpendicular	17,2	16,30	0,81	29,63
56,0	Perpendicular	17,9	16,60	1,12	39,38
56,0	Paralelo	17,9	16,90	2,05	23,34
56,0	Paralelo	17,7	15,70	1,18	20,08
56,0	Transversal	17,8	16,20	1,95	35,52
56,0	Paralelo	17,8	13,40	0,41	20,15
56,0	Transversal	17,8	13,60	0,81	49,48
61,0	Paralelo	17,0	14,00	1,24	30,54
61,0	Transversal	17,0	15,10	0,55	31,05
61,0	Paralelo	17,2	16,20	1,54	25,77
61,0	Perpendicular	17,2	15,80	1,01	32,16
61,0	Transversal	17,6	10,40	1,03	33,06
61,0	Paralelo	17,5	11,10	0,85	31,56
64,0	Paralelo	17,5	14,30	1,49	25,22
64,0	Perpendicular	17,5	14,60	1,60	23,65
64,0	Paralelo	17,0	12,00	0,56	32,74
64,0	Transversal	16,9	12,30	0,76	29,03
64,0	Paralelo	17,3	15,80	1,38	27,94
64,0	Perpendicular	17,1	12,70	0,90	24,32

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad;  $c'$ : cohesión efectiva;  $\phi$ : ángulo de rozamiento interno

Para cada una de las direcciones estudiadas se han obtenido los parámetros resistentes del conjunto de los datos (Tabla 3-73).

Tabla 3-73. Parámetros resistentes medios de las muestras en función de su orientación (SECEG, 2001).

Tallado	$c'$ (kPa)	$\phi$ (°)
Perpendicular	111	34
Paralelo	120	24
Transversal	103	32

$c'$ : cohesión efectiva;  $\phi$ : ángulo de rozamiento interno

#### 3.4.4.5 Excavación de la Galería de Tarifa (1995)

Las muestras procedentes de la excavación de la galería de Tarifa fueron ensayadas por el laboratorio de Geocontrol (Tabla 3-74 a Tabla 3-77).

Tabla 3-74. Ensayos de estado realizados sobre materiales de la galería de Tarifa (Geocontrol, 1998).

Sondeo	Prof. (m)	Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	Sr (%)
1	3,95	Argilita	17,98	17,27	27,49	89,8
1	5,20	Argilita	20,35	12,79	28,71	89,4
1	5,45	Argilita	19,31	13,14	27,87	82,6
1	5,70	Argilita	19,23	14,37	28,70	83,7
1	6,30	Argilita	17,65	19,19	27,49	94,6
1	6,42	Argilita	17,49	19,36	28,24	88,9
1	6,60	Argilita	19,01	13,15	26,85	85,6
2	4,33	Argilita	19,56	11,93	27,08	84
2	4,80	Argilita	20,17	11,63	27,82	99,9
2	5,84	Argilita	19,10	14,69	27,46	92,2
2	6,64	Argilita	20,47	11,99	28,33	88,5
5	6,95	Argilita	19,43	14,83	28,33	91,7
5	4,25	Argilita	19,03	16	28,37	92,5
5	4,47	Argilita	19,53	14,84	28,10	95
5	4,90	Argilita	17,98	17,36	27,98	87,3
6	4,05	Argilita	19,10	13,36	28,07	79,9
6	4,26	Argilita	20,67	10,97	27,60	90,3
6	5,60	Argilita	20,01	12,2	27,27	91,7
6	5,75	Argilita	21,53	9,45	27,81	90,1
6	6,00	Argilita	20,24	12,15	28,19	87,2
6	6,50	Argilita	20,63	11,55	27,87	91,7
3	4,00	Marga	19,0	15,28	27,27	94,9
3	5,50	Marga	22,6	7,80	28,04	91,3
3	7,00	Marga	22,1	7,03	27,48	79,7
4	4,05	Marga	19,8	11,79	27,35	84,1
4	4,35	Marga	19,8	11,52	27,62	88,2
4	6,50	Marga	20,7	9,38	27,46	78,4
4	7,70	Marga	21,3	10,45	28,41	89,3
7	6,50	Marga	21,3	8,66	27,4	82,7
7	7,30	Marga	20,5	11,03	28,02	83,9
7	8,15	Marga	19,9	11,84	26,5	83,9
8	6,43	Marga	19,7	12,22	27,47	84,7
8	7,60	Marga	20,0	11,35	27,1	86,3
8	7,90	Marga	20,8	9,5	27,77	79,2

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad;  $\gamma_s$ : peso específico de las partículas; Sr: grado de saturación

Tabla 3-75. Ensayos de identificación realizados sobre muestras de la Galería de Tarifa (Geocontrol, 1998).

Sondeo	Prof. (m)	Material	Granulometría			Límites			Ctos (%)	Hinch. libre (%)	Presión hinch. (kPa)
			<0,002	<0,01	>0,06	LL	LP	IP			
1	4,30	Argilita	22	66,83	96,71	67,4	31,4	36	0,3	-	-
1	5,45	Argilita	19,03	49,6	81,41	-	-	-	-	12,8	165
1	5,70	Argilita	34,35	36,79	89,94	68,1	31,1	37	0,9	-	2,13
1	6,35	Argilita	20	56,9	91,48	-	-	-	-	-	-
1	6,60	Argilita	25	67,24	94,97	-	-	-	-	-	-
2	4,80	Argilita	25,5	54,95	89,3	59,6	28,1	31,5	0,36	18	125
2	5,50	Argilita	18,86	59,67	89,35	-	-	-	-	-	-
2	5,90	Argilita	18,24	55,36	91,53	-	-	-	-	-	-
2	6,55	Argilita	15,87	51,66	84,97	-	-	-	-	-	-
2	6,68	Argilita	21,5	56,57	89,95	-	-	-	-	-	-
5	4,90	Argilita	29,88	78,12	95,24	72,1	31,9	40,2	0,81	4	156
6	4,20	Argilita	-	-	-	52,8	24,6	28,2	0,52	8,6	12
6	5,60	Argilita	24,32	53,27	86,22	-	-	-	-	-	-
3	5,20	Marga	29,04	47,15	78,37	-	-	-	-	2,6	20
7	5,90	Marga	24,61	42,76	71,68	-	-	-	-	-	-
4	6,80	Marga	24,57	46,62	75,29	-	-	-	-	-	-
4	7,00	Marga	22,82	41,2	73,85	-	-	-	-	0,6	7
8	4,85	Marga	24,13	40,42	62,35	-	-	-	-	-	-
8	7,80	Marga	35,16	56,93	81,82	-	-	-	-	-	-
3	5,90	Marga	-	-	-	48,1	24,3	3,8	16,18	-	-
4	4,35	Marga	-	-	-	35,4	20,5	14,9	10,37	-	-
7	8,30	Marga	-	-	-	38,9	24,1	14,8	4,79	0,3	20
8	6,40	Marga	-	-	-	35,4	21,4	14	3,73	0,5	32

LL: límite líquido; LP: límite plástico; IP: índice de plasticidad; Ctos: contenido en carbonatos.

Tabla 3-76. Ensayos de resistencia a compresión simple en muestras de la galería de Tarifa (SECEG, 2001).

Muestra	Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	E (MPa)	$\nu$	RCS (MPa)
M-79	Argilita	22,0	13,73	152	-	3,7
M-80	Argilita	22,7	13,17	222	-	5,0
M-81	Argilita	25,0	10,42	-	0,2	-
M-82	Argilita	22,7	11,16	164	0,33	4,9
M-83	Argilita	22,6	12,26	167	-	4,2
M-84	Argilita	21,6	12,14	425	0,3	4,3
M-85	Argilita	19,9	11,79	131	-	2,9
M-86	Argilita	20,9	11,43	558	-	55,8
M-87	Argilita	20,0	9,62	55	-	11,1
M-87	Argilita	19,1	13,65	-	-	-
M-87	Argilita	19,6	14,09	-	-	-
M-87 (2)	Argilita	20,2	10,65	86	-	2,15
M-87 A	Argilita	20,3	12,23	-	-	-
M-87 B	Argilita	21,4	9,90	-	-	-
M-87 C	Argilita	21,2	10,40	-	-	-
M-87 D	Argilita	21,1	9,98	-	-	-
M-88 (1)	Argilita	20,0	10,94	-	-	-
M-88 (2)	Argilita	18,0	11,51	-	-	-
M-87 A	Argilita	20,3	12,23	-	-	-
M-87 B	Argilita	21,4	9,90	-	-	-
M-87 C	Argilita	21,2	10,40	-	-	-
M-87 D	Argilita	21,1	9,98	-	-	-
M-88 (1)	Argilita	20,0	10,94	-	-	-
M-88 (2)	Argilita	18,0	11,51	-	-	-
M-87 A	Argilita	20,3	12,23	-	-	-
M-87 B	Argilita	21,4	9,90	-	-	-
M-87 C	Argilita	21,2	10,40	-	-	-
M-87 D	Argilita	21,1	9,98	-	-	-
M-88 (1)	Argilita	20,0	10,94	-	-	-
M-88 (2)	Argilita	18,0	11,51	-	-	-
M-89	Argilita	21,4	7,03	80	-	9,6
M-90	Argilita	20,5	11,96	-	-	-
M-91 (1)	Argilita	23,2	9,45	-	-	-
M-91 (2)	Argilita	22,9	10,70	-	-	-
M-91 (3)	Argilita	23,1	9,92	-	-	-

Muestra	Material	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	E (MPa)	$\nu$	RCS (MPa)
M-92 (1)	Argilita	20,8	10,94	303	-	5,31
M-92 (2)	Argilita	21,2	9,81	-	-	4,77
M-93	Argilita	20,6	11,70	-	-	-
M-94 (1)	Argilita	23,2	6,75	-	-	-
M-94 (2)	Argilita	19,7	12,87	65	-	2,1
M-95 (1)	Argilita	19,3	13,59	54	-	1,48
M-95 (2)	Argilita	19,7	12,00	50	-	2,77
M-95 (3)	Argilita	21,8	12,08	-	-	-
M-96	Argilita	17,8	18,77	34	-	1,11
M-96 (2)	Argilita	23,4	10,68	-	-	-
M-98	Argilita	26,0	7,34	772	-	6
M-99	Argilita	24,1	5,73	1494	-	10,2
M-100	Argilita	23,5	7,99	96	-	1,4
M-101 (1)	Argilita	23,8	6,95	-	-	-
M-101 (2)	Argilita	23,5	6,77	-	-	6,3
M-102 (1)	Argilita	24,3	5,61	-	-	-
M-102 (2)	Argilita	23,5	6,45	-	-	-
M-102 (3)	Argilita	24,3	8,48	448	-	3,9
M-103 (1)	Argilita	23,3	8,65	-	-	-
M-103 (2)	Argilita	22,3	9,15	40	-	1,8
M-106 (1)	Argilita	26,0	8,56	-	-	-
M-106 (2)	Argilita	24,0	7,96	150	-	1,4
M-108 (1)	Argilita	23,5	8,51	-	-	-
M-108 (2)	Argilita	23,8	7,94	-	-	-
M-113	Argilita	23,6	8,43	675	-	2,2

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; E: módulo de deformación;  $\nu$ : coeficiente de Poisson; RCS: resistencia a compresión simple.

Tabla 3-77. Ensayos de resistencia a compresión triaxial realizados sobre muestras de la Galería de Tarifa (Geocontrol, 1998).

Muestra	Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_1$ (kPa)
M-79 (1)	Argilita	22,0	13,7	1	2,65
M-80 (1)	Argilita	22,7	12,2	2	8,29
M-81	Argilita	25,0	8,2	1,5	6,33
M-82 (2)	Argilita	22,6	9,0	2,5	7,41
M-83 (2)	Argilita	22,5	12,1	2,5	8,66
M-84 (3)	Argilita	25,3	12,1	2	9,63
M-85 (2)	Argilita	24,6	11,8	0,5	3,10
M-86 (2)	Argilita	23,0	11,4	0,5	2,34
M-87	Argilita	21,4	9,9	0,2	0,57
M-87	Argilita	21,2	10,4	0,32	0,91
M-87	Argilita	21,0	10,0	0,52	1,32
M-87	Argilita	20,3	12,2	0,26	0,57
M-90	Argilita	20,5	12,0	0,41	0,88
M-93	Argilita	20,6	11,7	0,67	1,36
M-91 (1)	Argilita	23,2	9,5	0,2	3,30
M-91 (2)	Argilita	22,9	10,7	0,3	4,39
M-91 (3)	Argilita	23,1	9,9	0,6	5,83
M-94 (1)	Argilita	23,2	6,8	0,2	2,36
M-95 (3)	Argilita	21,8	12,1	0,2	1,27
M-96 (2)	Argilita	23,4	10,7	1	1,77
M-101 (1)	Marga fracturada	23,8	7,0	0,4	1,15
M-102 (1)	Argilita	24,3	5,6	0,2	1,13
M-102 (2)	Argilita	23,5	6,5	0,1	4,79
M-103 (1)	Marga fracturada	23,3	8,7	0,5	0,96
M-106 (1)	Marga fracturada	23,6	8,6	0,5	1,10
M-108 (1)	Marga fracturada	23,5	8,5	0,3	0,92
M-108 (2)	Marga fracturada	23,8	7,9	1,2	5,11

$\gamma$ : peso específico;  $\omega$ : humedad;  $\sigma_3$ : tensión de confinamiento;  $\sigma_1$ : tensión axial en rotura.

### 3.4.5 Brechas cuaternarias

Las brechas, principalmente arcillosas, son uno de los principales problemas a los que tiene que enfrentarse el proyecto del futuro túnel. Los resultados de los ensayos realizados sobre las muestras obtenidas en diferentes campañas de sondeos marinos se presentan a continuación.

#### 3.4.5.1 LPEE (1999)

Las muestras de las brechas extraídas en la campaña Norskald-98 (véase apartado 3.2.9) fueron ensayadas (Tabla 3-78) por el *Laboratoire Publique d'Essais et d'Etudes* (LPEE, 1999).

Tabla 3-78. Ensayos de identificación (LPEE, 1999).

Sondeo	Prof. (m)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	Plasticidad			Granulometría		
				LL	LP	IP	>2	<0,08	<0,02
NK-2G	192	18,0	19	51	21	30	15	64	24
NK-2G	213	17,2	19,6	40	20	20	4	92	58
NK-2G	149	19,0	15,6	-	-	-	4	93	42
NK-3E	188	18,0	15,5	-	-	-	-	-	-
NK-3E	191	20,0	16,5	49	23	26	-	-	-
NK-3E	220	22,8	3,2	42	24	18	-	-	-
NK-12	147	18,0	17,5	-	-	-	3	93	42
NK-6	197	19,5	15,2	-	-	-	11	87	50
NK-3E	213	18,8	16,8	-	-	-	7	90	41
NK-2G	157	19,5	14,6	46	25	21	-	-	-
NK-2G	178	18,5	16,2	-	-	-	5	92	42
NK-2G	187	17,8	17,9	53	27	26	-	-	-
NK-12	96	22,2	8,7	-	-	-	-	-	-
NK-2G	102	18,9	15,6	53	29	24	-	-	-
NK-12	196	22,4	8	-	-	-	29	59	25
NK-12	199	24,6	2,6	-	-	-	-	-	-
NK-12	60	23,3	7,0	-	-	-	79	19	6
NK-2G	66	-	-	-	-	-	-	-	-
NK-3E	165	17,2	12,0	-	-	-	19	60	40
NK-2G	95	19,0	12,7	56	22	36	-	-	-
NK-12	42	-	-	-	-	-	-	-	-
NK-3E	153	18,8	15,6	67	31	36	-	-	-
NK-12	46	22,2	8,9	-	-	-	0	100	47
NK-3E	158	19,2	14,8	-	-	-	17	48	20
NK-3E	173	17,9	20	-	-	-	3	71	40
NK-12	91	22,9	4,9	-	-	-	-	-	-

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; LL: límite líquido; LP: Límite plástico; IP: índice de plasticidad.

A partir de los 24 ensayos de resistencia a compresión triaxiales (TCU) realizados se obtuvieron los siguientes parámetros resistentes del criterio de rotura de Mohr-Coulomb:

- $c' = 100$  kPa
- $c_u = 150$  kPa
- $\phi' = 13^\circ$
- $\phi_u = 10^\circ$

Se ha medido el hinchamiento libre en tres muestras con valores de 1,25 %, 2,68 % y 5,7 %.

## 3.4.5.2 CEDEX (1999)

Varias muestras de brechas provenientes de los sondeos, realizados en las zonas 2 y 3, de la campaña Norskald-98 (véase apartado 3.2.9) fueron ensayadas en una amplia campaña desarrollada en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (1999).

Esta serie de ensayos consistió en:

- 11 granulometrías por tamizado
- 6 granulometrías láser
- 11 determinaciones de plasticidad
- 11 determinaciones de pesos específicos
- 11 determinaciones de contenido en sulfatos, carbonatos y materia orgánica
- 24 determinaciones de la densidad seca
- 24 medidas de humedad natural
- 3 ensayos de resistencia a compresión simple
- 7 ensayos de resistencia a compresión triaxiales CU
- 1 ensayo triaxial CU a extensión
- 4 ensayos de resistencia al corte directo
- 2 medidas de permeabilidad en célula triaxial

De la Tabla 3-79 a la Tabla 3-88 se recogen los resultados de estos ensayos:

Tabla 3-79. Determinación de la plasticidad (CEDEX, 1999).

Parámetro	Nº Ensayos	Media	Mínimo	Máximo
Límite líquido	11	49	38	53
Límite plástico	11	25	22	28
Índice de plasticidad	11	24	17	29

Tabla 3-80. Parámetros de estado (CEDEX, 1999).

Sondeo	Prof. (m)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	Sr (%)
NK-2G	95	18,1	17,1	87,5
NK-2G	95	17,5	17,1	79,8
NK-2G	118	17,7	14,1	67,8
NK-2G	118	17,9	14,2	70,4
NK-2G	147	18,7	16,7	95,4
NK-2G	147	18,8	16,4	95,2
NK-2G	177	18,3	16,8	93,2
NK-2G	177	18,5	16,3	93,5
NK-2G	202	17,4	18,0	84,2
NK-2G	202	18,3	17,5	94,3
NK-3D	145	18,2	17,4	93,6
NK-3D	145	18,3	17,3	94,6
NK-3D	145	18,7	16,1	94,1
NK-3D	160	17,6	19,4	96,0
NK-3D	160	17,7	19,4	94,5
NK-3D	160	17,0	19,5	85,3
NK-3E	159	18,8	14,3	88,5
NK-3E	180	19,6	13,3	88,3
NK-3E	180	19,2	14,2	88,1
NK-3E	192	18,6	17,6	106,1
NK-3E	192	19,4	19,4	135,0
NK-3E	192	18,3	18,7	107,0
NK-3E	198	17,4	17,3	78,1



Sondeo	Prof. (m)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	Sr (%)
NK-3E	198	17,6	17,3	80,5

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad; Sr: grado de saturación.

Tabla 3-81. Ensayos de resistencia a compresión simple (CEDEX, 1999).

Sondeo	Profundidad (m)	RCS (kPa)	$\varepsilon$ rotura (%)	$\omega$ (%)
NK-2G	95,25	94	2,7	17,1
NK-2G	147,20	202	4,2	16,7
NK-2G	147,20	257	3,4	16,4

RCS: resistencia a compresión simple;  $\varepsilon$ : deformación en rotura;  $\omega$ : humedad

Tabla 3-82. Ensayos de resistencia a compresión triaxial (CEDEX, 1999).

Sondeo	Profundidad (m)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
NK-2G	202	195	15,5
NK-3D	145,2	55	18,5
NK-3D	159,6	70	17,5
NK-3E	159,0	-	-
NK-3E	179,7	160	17,75
NK-3E	191,0	150	18,75
NK-3E	198,0	310	9,5

$c'$ : cohesión;  $\phi'$ : ángulo de rozamiento interno

Del análisis conjunto de estos ensayos se han obtenido los siguientes parámetros resistentes, que según el informe, se consideran más representativos del conjunto el material:

- $c' = 100$  kPa
- $\phi' = 18^\circ$

A partir de las medidas de deformación en los ensayos de resistencia a compresión triaxiales se calcularon los módulos de deformación secantes de cada una de las muestras (Tabla 3-83):

Tabla 3-83. Módulos de deformación obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión triaxiales (CEDEX, 1999)

Sondeo	Profundidad (m)	$E_{\text{secante}}$ (MPa)	$\sigma'_3$ (kPa)
NK-2G	202	85	900
NK-2G	202	200	2400
NK-3D	145	60	400
NK-3D	145	95	1400
NK-3D	145	55*	2400
NK-3D	159	50	400
NK-3D	159	150	1400
NK-3D	159	200	2400
NK-3E	159	200	2400
NK-3E	179	**	900
NK-3E	179	180	2400
NK-3E	191	**	400
NK-3E	191	160	1400
NK-3E	191	220	2400
NK-3E	198	85	900
NK-3E	198	170	1400

$E_{\text{secante}}$ : módulo de deformación secante;  $\sigma'_3$ : tensión de confinamiento; (\*) Valor anómalo; (\*\*) Problemas en la medida de las deformaciones.

Del análisis de estos datos se observa un aumento de la rigidez del material con el nivel de confinamiento. En la Tabla 3-84 se recogen los módulos de deformación medios en función del nivel de confinamiento.

Tabla 3-84. Deformabilidad en función de la presión de confinamiento (CEDEX, 1999).

$\sigma'_3$ (MPa)	E secante medio (MPa)
0,4	55
0,9	85
1,4	145
2,4	200

$E_{\text{secante}}$ : módulo de deformación secante;  $\sigma'_3$ : tensión de confinamiento

Tabla 3-85. Ensayos de extensión triaxial (CEDEX, 1999).

Sondeo	Profundidad (m)	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
NK-2G	117,5	100	19,5

$c'$ : cohesión efectiva;  $\phi'$ : ángulo de rozamiento interno

Tabla 3-86. Ensayos de resistencia al corte directo (CEDEX, 1999).

Sondeo	Profundidad	Tipo de muestra	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
NK-2G	118	Inalterada	0	27
NK-3D	145	Remoldeada*	65	18,5
NK-3E	198	Remoldeada*	80	16,5
NK-2G	177	Remoldeada* (no tamizada)	90	17,5

$c'$ : cohesión efectiva;  $\phi'$ : ángulo de rozamiento interno; (\*) Las muestras remoldeadas se prepararon con densidad y humedad medias de las muestras recibidas ( $18,3 \text{ kN/m}^3$  y 17 %).

Tabla 3-87. Ensayos de permeabilidad (CEDEX, 1999).

Sondeo	Profundidad (m)	Permeabilidad (m/s)
NK-3E	179,75	$5,3 \cdot 10^{-11}$
NK-3E	192	$7,7 \cdot 10^{-11}$
NK-3E	192	$1,8 \cdot 10^{-10}$
NK-3E	192	$1,6 \cdot 10^{-10}$

Como resumen del estudio, en la Tabla 3-88 se recogen los valores representativos de los resultados del conjunto de ensayos realizados.

Tabla 3-88. Valores representativos del estudio (CEDEX, 1999)

Propiedad	Unidad	Nº Ensayos	Media	Mínimo	Máximo
Pase 0,08 UNE	%	11	97	90	98
Contenido arcilla	%	11	35	25	40
Límite líquido	%	11	49	38	53
Límite plástico	%	11	25	22	28
Índice de plasticidad	%	11	24	17	29
Peso específico part.	%	11	2,76	2,69	2,83
Contenido en sulfatos	%	11	0,070	0,040	0,134
Contenido en ctos.	%	11	2,8	1,0	5,2
Contenido en m. org.	%	11	0,52	0,30	0,84
Humedad natural	%	24	16,9	13,3	19,4

Propiedad	Unidad	Nº Ensayos	Media	Mínimo	Máximo
Peso específico sec	kN/m <sup>3</sup>	24	18,25	17,0	19,6
Compresión simple	kPa	4	185	94	257
Cohesión	kPa	21	100	40	195
Ángulo de rozamiento	°	21	17,5	15,5	18,75
Módulo secante	MPa	16	140	50	220
Permeabilidad	m/s	4	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$5,3 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-10}$

### 3.4.5.3 Geocontrol (1999)

En 1999 son ensayadas muestras procedentes de la campaña Norskald-98 (véase apartado 3.2.9). Los materiales ensayados se corresponden con brechas arcillosas.

El informe de estos ensayos corre a cargo de la empresa Geocontrol (1999).

La campaña de ensayos consistió en:

- 15 Determinaciones de la humedad, densidad y peso específico de las partículas sólidas.
- 5 Determinaciones del contenido en carbonatos.
- 5 Granulometrías por sedimentación.
- 5 Determinaciones de límites de Atterberg.
- 31 Ensayos de resistencia al corte directo.
- 5 Determinaciones de la presión de hinchamiento.
- 5 Determinaciones del hinchamiento libre.
- 39 Ensayos de permeabilidad en célula triaxial.
- 4 Ensayos de resistencia al corte en caja tipo Hoek.

De la Tabla 3-89 a la Tabla 3-92 se recogen los resultados de estos ensayos.

Tabla 3-89. Ensayos de estado e identificación (Geocontrol, 1999).

Sondeo	Prof. (m)	$\omega$ (%)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Gs	Sr (%)	Ctos. (%)	Granulometría (%)			Plasticidad		
							0,02 mm	0,01 mm	0,06 mm	LL	LP	IP
NK-3D	150	18,11	17,84	2,678	96,7	5,2	40	67	87	60,6	30,8	29,8
NK-3D	150	19,02	17,60	2,682	97,4	-	-	-	-	-	-	-
NK-3E	153	14,88	18,85	2,740	89,9	-	-	-	-	-	-	-
NK-3E	168	17,66	17,92	2,711	93,4	107	40	70	90	67,6	32,8	34,8
NK-3E	173	16,56	17,67	2,876	75,9	-	-	-	-	-	-	-
NK-3E	184	17,16	18,44	2,817	91,6	1,92	42	70	90	51,6	27,8	23,8
NK-3E	213	18,93	17,64	2,702	96,2	-	-	-	-	-	-	-
NK-2G	52	17,24	18,25	2,769	92,3	-	-	-	-	-	-	-
NK-2G	67	17,91	18,22	2,756	96,3	-	-	-	-	-	-	-
NK-2G	112	16,76	18,24	2,705	93,9	1,09	35	65	83	48,9	24,8	24,1
NK-2G	133	16,10	18,24	2,755	86,9	-	-	-	-	-	-	-
NK-2G	149	16,66	18,67	2,806	92,9	-	-	-	-	-	-	-
NK-2G	163	17,83	18,29	2,784	95,1	1,43	47	66	77	50,3	24,7	25,6
NK-2G	189	16,74	18,16	2,822	85,3	-	-	-	-	-	-	-
NK-2G	213	16,88	18,17	2,813	86,6	-	-	-	-	-	-	-

$\omega$ : humedad;  $\gamma$ : peso específico aparente; Gs: peso específico de las partículas; Sr: grado de saturación; Ctos: contenido en carbonatos; LL: límite líquido; LP: límite plástico; IP: índice de plasticidad.

Tabla 3-90. Ensayos de permeabilidad (Geocontrol, 1999).

Sondeo	Profundidad (m)	Permeabilidad (m/s)
NK-3D	150	$4,5 \cdot 10^{-11}$

Sondeo	Profundidad (m)	Permeabilidad (m/s)
NK-3D	150	$2,8 \cdot 10^{-11}$
NK-3D	150	$1,4 \cdot 10^{-11}$
NK-3E	153	$1,2 \cdot 10^{-10}$
NK-3E	153	$4,6 \cdot 10^{-11}$
NK-3E	123	$2,2 \cdot 10^{-11}$
NK-3E	168	$8,9 \cdot 10^{-11}$
NK-3E	168	$6,7 \cdot 10^{-11}$
NK-3E	168	$5,5 \cdot 10^{-11}$
NK-3E	173	$8,1 \cdot 10^{-10}$
NK-3E	173	$4,3 \cdot 10^{-10}$
NK-3E	173	$2,1 \cdot 10^{-10}$
NK-3E	213	$6,8 \cdot 10^{-10}$
NK-3E	213	$4,2 \cdot 10^{-10}$
NK-3E	184	$4,2 \cdot 10^{-11}$
NK-3E	184	$3,7 \cdot 10^{-11}$
NK-3E	184	$2,4 \cdot 10^{-11}$
NK-2G	52	$3,3 \cdot 10^{-10}$
NK-2G	52	$1,2 \cdot 10^{-10}$
NK-2G	52	$3,1 \cdot 10^{-10}$
NK-2G	67	$9,4 \cdot 10^{-11}$
NK-2G	67	$2,2 \cdot 10^{-11}$
NK-2G	112	$6,1 \cdot 10^{-11}$
NK-2G	112	$7,3 \cdot 10^{-11}$
NK-2G	112	$6,0 \cdot 10^{-11}$
NK-2G	133	$2,5 \cdot 10^{-10}$
NK-2G	133	$1,6 \cdot 10^{-10}$
NK-2G	149	$3,7 \cdot 10^{-10}$
NK-2G	149	$4,8 \cdot 10^{-10}$
NK-2G	149	$1,7 \cdot 10^{-11}$
NK-2G	163	$4,1 \cdot 10^{-10}$
NK-2G	163	$3,4 \cdot 10^{-10}$
NK-2G	163	$1,5 \cdot 10^{-10}$
NK-2G	187	$2,2 \cdot 10^{-10}$
NK-2G	187	$1,8 \cdot 10^{-10}$
NK-2G	187	$1,3 \cdot 10^{-10}$
NK-2G	213	$1,7 \cdot 10^{-10}$
NK-2G	213	$1,3 \cdot 10^{-10}$
NK-2G	213	$7,7 \cdot 10^{-11}$

A partir de los ensayos de resistencia al corte se calcularon los parámetros del criterio de rotura de Hoek y Brown con el conjunto de los datos. Los parámetros recogidos en el informe son los siguientes:

- $m_i = 11,3$
- $\sigma_c = 0,4 \text{ MPa}$

Como resumen del estudio, en la Tabla 3-91 se recogen los valores medios de la campaña.

Tabla 3-91. Valores representativos de la campaña de ensayos de laboratorio (Geocontrol, 1999).

Parámetro	Unidad	Valor medio
Humedad natural	%	17,23
Densidad	$\text{kg/m}^3$	1.814
Peso específico de las partículas sólidas	$\text{kg/m}^3$	2.761
Grado de saturación	%	91,3
Contenido en carbonatos	%	2,14
Pase por el tamiz UNE 0,02 mm	%	40,8
Pase por el tamiz UNE 0,01 mm	%	67,6
Pase por tamiz UNE 0,006	%	85,4
Límite líquido	%	55,8
Límite plástico	%	28,1

Parámetro	Unidad	Valor medio
Índice de plasticidad	%	27,7
Presión de hinchamiento	MPa	0,104
Hinchamiento libre	%	6,2

#### 3.4.5.4 ETH-Zurich (2013)

Entre 2008 y 2013 el ETH de Zurich llevó a cabo una campaña de ensayos sobre muestras de brechas, provenientes de las campañas Norskald (apartado 3.2.9) y Kingfisher (apartado 3.2.10), para determinar sus propiedades geotécnicas en las condiciones más cercanas a las que presentan *in situ* como son la saturación total y alta presión de confinamiento (Dong *et al.*, 2013).

Para esta campaña se utilizó un equipo triaxial para rocas (célula tipo Hoek) con ciertas modificaciones que permitieron la medida de presiones intersticiales. Los ensayos se realizaron mediante la técnica de rotura múltiple.

Se realizaron un total de 12 ensayos, los cuales se recogen en la Tabla 3-92.

Tabla 3-92. Resultados de los ensayos de compresión triaxial con medida de presión de poro (Dong *et al.*, 2013).

Ensayo	Tipo	c' (MPa)	$\phi'$ (°)	Permeabilidad (m/s)	Duración (días)
Z01	CD	0,376	14,3	$4,67 \cdot 10^{-12}$	35
Z02	CU	0,611	7,1	$9,92 \cdot 10^{-12}$	76
Z03	CD	1,306	9,4	$1,62 \cdot 10^{-12}$	97
Z04	CU	0,367	13,7	$9,36 \cdot 10^{-12}$	93
Z05	CD	0,327	9,0	$3,86 \cdot 10^{-13}$	54
Z09	CU	0,375	26,0	$9,40 \cdot 10^{-13}$	30
Z10	CD	0,076	20,4	$1,13 \cdot 10^{-11}$	49
Z11	CD	0,233	26,4	$2,09 \cdot 10^{-11}$	22
Z12	CU	0,120	24,5	$1,52 \cdot 10^{-11}$	36
Z13	CU	0,107	21,1	$5,76 \cdot 10^{-12}$	28
Z14	CD	0,263	20,1	$2,09 \cdot 10^{-12}$	49
Z15	CD	0,108	22,2	$6,69 \cdot 10^{-12}$	39

c': cohesión efectiva;  $\phi'$ : ángulo de rozamiento interno.

A partir de los ensayos realizados, los autores concluyen que las brechas se encuentran normalmente consolidadas o ligeramente sobreconsolidadas (Dong *et al.*, 2013).

### 3.4.6 Arenas bioclásticas

Estas arenas, localizadas sobre los depósitos de brecha forman parte de los rellenos del paleocanal sur que debería atravesar el futuro túnel. Los ensayos realizados en estas muestras se recogen a continuación.

#### 3.4.6.1 CEDEX (2005)

En 2005 el Laboratorio de geotecnia del CEDEX realiza una serie de ensayos sobre muestras de arenas bioclásticas provenientes de las campaña Kingfisher-05 (véase apartado 3.2.10)

En esta batería de ensayos de laboratorio se llevaron a cabo seis granulometrías, seis determinaciones de peso específico, seis medidas de humedad natural, un ensayo de

resistencia a compresión triaxial consolidado no drenado (TCU) con seis probetas, cuatro medidas de la permeabilidad y un estudio mineralógico sobre 5 muestras.

Desde la Tabla 3-93 a la Tabla 3-96 se recogen los resultados de los ensayos realizados:

Tabla 3-93. Resultados de los ensayos de identificación (CEDEX, 2005).

Sondeo	Prof. (m)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	$\gamma_{ap}$ (kN/m <sup>3</sup> )	CaCO <sub>3</sub> (%)	IP
KF-16	51,25	19,5	15,8	22,6	50,0	No plástico
KF-16	53,80	19,7	15,8	23,4	46,4	No plástico
KF-16	53,80	19,6	17,0	22,9	46,4	No plástico
KF-16	58,80	19,1	17,6	22,5	34,1	No plástico
KF-16	61,25	21,3	11,6	23,8	71,9	No plástico
KF-16	66,00	19,6	17,4	23,0	84,7	No plástico

$\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad;  $\gamma_{ap}$ : peso específico aparente; CaCO<sub>3</sub>: contenido en carbonato cálcico; IP: índice de plasticidad.

Tabla 3-94. Resultado de los ensayos de resistencia a compresión triaxial (CEDEX, 2005).

Probetas	Interpretación	c (kPa)	$\phi$ (°)
6	Con cohesión	21,7	41,2
	Sin cohesión	0	41,8
5 (se descarta 1)	Con cohesión	156	35,3
	Sin cohesión	0	41,4

c: cohesión efectiva;  $\phi$ : ángulo de rozamiento interno;

Tabla 3-95. Ensayos de permeabilidad (CEDEX, 2005).

Sondeo	Profundidad (m)	Permeabilidad (m/s)
KF-16	53,80	$1,5 \cdot 10^{-6}$
KF-16	58,10	$9,7 \cdot 10^{-7}$
KF-16	61,25	$8,8 \cdot 10^{-8}$
KF-16	66,00	$1,1 \cdot 10^{-5}$

Tabla 3-96. Ensayos de porosidad con mercurio (CEDEX, 2005).

Sondeo	Prof. (m)	Macroporosidad (%)	Microporosidad efectiva (%)	Porosidad no accesible	Porosidad total (%)
KF-16	51,25	2,6	24,9	1,1	28,6
KF-16	53,80	10,4	16,5	1,6	28,5
KF-16	58,80	6,5	20,6	2,7	29,8
KF-16	61,25	0,6	20,8	1,7	23,1
KF-16	66,00	9,0	18,1	1,3	28,5

#### 3.4.6.2 CEPASA (2005)

En 2005, CEPASA realiza, a petición de Geocontrol una serie de ensayos de identificación y permeabilidad (Tabla 3-97) sobre cuatro muestras proveniente de la campaña Kingfisher-05 y una muestra de la campaña Bucantaur-97 (véanse apartados 3.2.8 y 3.2.10).

Tabla 3-97. Ensayos realizados por CEPASA (2005)

Sondeo	Prof. (m)	$\omega$ (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Pase 2 mm (%)	Pase 0,08 mm (%)	$G_s$	$S_r$ (%)	Permeabilidad (m/s)
KF-16	53,3	15,88	18,73	55,02	6,14	2,76	92,9	$6,11 \cdot 10^{-8}$
KF-16	56,3	21,03	17,60	66,07	7,61	2,80	99,8	$1,48 \cdot 10^{-9}$
KF-16	59,8	21,63	17,11	77,36	5,70	2,76	97,7	$2,28 \cdot 10^{-7}$
KF-16	63,9	22,35	16,85	84,80	6,36	2,75	97,2	$7,45 \cdot 10^{-10}$
KF-16	68,3	16,15	19,28	46,07	14,03	2,80	99,9	$2,88 \cdot 10^{-8}$

$\omega$ : humedad;  $\gamma_d$ : peso específico seco;  $G_s$ : Peso específico de las partículas;  $S_r$ : grado de saturación

### 3.5 Cantidad de datos analizados

De los cerca de 600 informes revisados se han extraído más de 4500 datos entre ensayos de campo y ensayo de laboratorio.

También se ha recogido un resumen de las descripciones de más de los más de 7000 m de sondeo ejecutados así como de la galería de Tarifa, el pozo de Malabata, el pozo de Bolonia y las cinco zanjas experimentales realizadas.

En el apéndice II se han recogido los datos que, una vez eliminados errores, se han empleado en el análisis estadístico.

## **CAPÍTULO 4**

### **NUEVA CAMPAÑA CEDEX-SECEG - TARIFA 2012**





## 4. NUEVA CAMPAÑA CEDEX- SECEG - TARIFA 2012

---

En 2012 se llevó a cabo, dentro del marco de la investigación de esta tesis doctoral, una nueva campaña geotécnica que incluía sondeos, ensayos *in situ*, ensayos geofísicos y ensayos de laboratorio. La campaña se centró en el estudio de tres términos litológicos de la Unidad de Algeciras.

Esta campaña pretendía dar respuesta a las conclusiones emitidas por el comité de expertos creado a fin de evaluar el proyecto (Levy *et al.*, 2008) en las que se dudaba de la utilización de los ensayos de laboratorio para la caracterización de estos materiales. Mediante la comparación de los resultados obtenidos mediante ensayos de laboratorio, geofísicos e *in situ*, se buscaba la comparación y puesta a punto de diferentes técnicas a fin de optimizar futuras campañas *offshore* así como profundizar en la caracterización de estos materiales.

Los trabajos se localizaron en el interior de la Galería de Tarifa (véase apartado 3.1.3) con el fin de ensayar materiales poco alterados, alejados de la superficie, con sondeos relativamente cortos.

Los resultados de esta campaña se recogen en un informe emitido por el CEDEX (2012a, 2012b, 2012c, 2012d, 2012e) y han dado lugar a varias publicaciones y ponencias (Muñiz *et al.*, 2012; Perucho *et al.*, 2012; Muñiz Menéndez *et al.*, 2013; Perucho *et al.*, 2014).

La campaña se dividió en tres zonas correspondientes con los tres tramos litológicos de la Unidad de Algeciras que están representados en la galería de Tarifa:

- Zona 1: Flysh margo-areniscoso-micáceo
- Zona 2: Secuencia de Pelitas rojas
- Zona 3: Flysch calcáreo

Los trabajos realizados se dividen en una campaña de sondeos, la realización de ensayos presiométricos y una extensa campaña de ensayos de laboratorio. Dentro de este trabajo también se realizó una serie de ensayos geofísicos que, por no quedar dentro del marco de esta tesis doctoral, se han excluido en esta recopilación.

## 4.1 Campaña de sondeos

La campaña de perforación se planificó con cuatro sondeos con recuperación de testigo en cada una de las tres zonas mencionadas anteriormente. En cada una de las zonas se perforarían:

- 2 sondeos denominados presiométricos (SP) con el principal objetivo de la realización de este tipo de ensayos. Estos sondeos se perforaron con batería doble para dañar lo menos posible las paredes a fin de obtener la mayor información posible de los ensayos realizados en su interior.
- 2 sondeos con el objetivo principal de la toma de muestras inalteradas (SM). Uno de ellos se perforó con tubo triple y un diámetro de 101 mm a fin de obtener la mejor calidad posible en las muestras extraídas (SM-1). El otro se perforó con batería doble (SM-2). El sondeo perforado con tubo triple fue testificado.

En la Zona 3 se tuvieron que perforar dos sondeos adicionales debido a problemas de perforación en otros tantos sondeos. La localización de los sondeos en el interior de la galería de Tarifa se muestra en las Figuras 4-4 a 4-6:

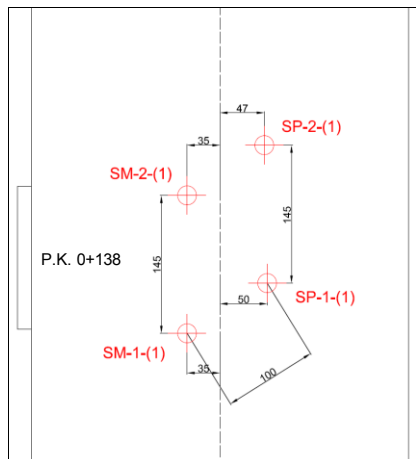


Figura 4-1. Esquema de la localización de los sondeos realizados en la Zona 1.

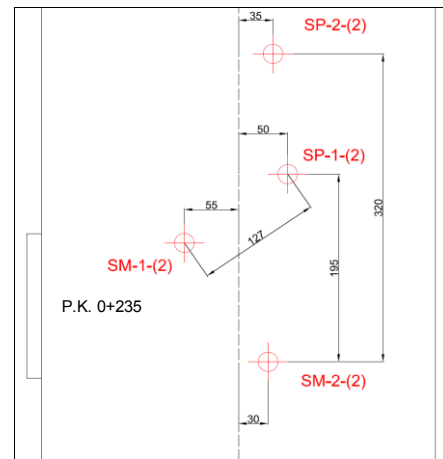


Figura 4-2. Esquema de la localización de los sondeos realizados en la Zona 2.

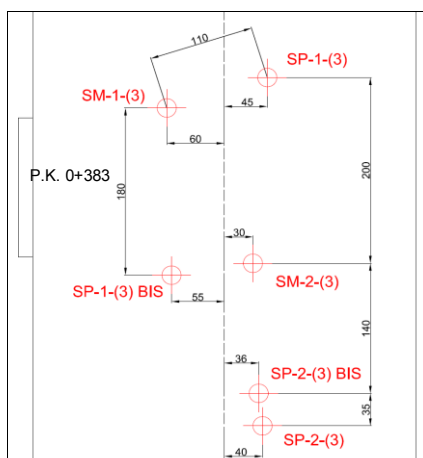


Figura 4-3. Esquema de la localización de los sondeos realizados en la Zona 3.

En la Tabla 4-1 se recogen las características de cada sondeo.

Tabla 4-1. Relación de sondeos perforados en la campaña CEDEX-SECEG 2012.

Sondeo	Zona	Longitud (m)	Sistema
SP-1-(1)	ZONA 1: Flysch margoso- areniscoso	20,20	Batería doble
SP-2-(1)		20,20	Batería doble
SM-1-(1)		19,85	Tubo triple
SM-2-(1)		15,30	Batería doble
SP-1-(2)	ZONA 2: Pelitas Rojas	20,20	Batería doble
SP-2-(2)		15,10	Batería doble
SM-1-(2)		20,05	Tubo triple
SM-2-(2)		16,00	Batería doble
SP-1-(3)	Zona 3: Flysch calcáreo	20,00	Batería doble
SP-1-(3) BIS		19,50	Batería doble
SP-2-(3)		5,30	Batería doble
SP-2-(3) BIS		15,20	Batería doble
SM-1-(3)		20,40	Tubo triple
SM-2-(3)		14,20	Batería doble

A continuación se resume la testificación de cada sondeo:

**- SP-1-(1):**

En el SP-1-(1) se atravesó una argilita algo limosa sana. A partir de 10 m se cortó un contacto entre la argilita y una capa de limolita arcillosa gris. El contacto se describió como subvertical, ondulado y rugoso. La fracturación observada, en general era escasa, con RQD en su mayoría superiores al 70 %. Entre los 9 y 14 m aparece una zona algo más fracturada con RQD entre 60 y 70 %. A partir de 15,15 m el RQD medido es del 100 %.

**- SP-2-(1):**

En el SP-2-(1) también se atravesó la argilita limosa con pequeñas intercalaciones areno-limosas. La fracturación era, en general, algo mayor que en el SP-1-(1). Hasta los 12 m el RQD variaba entre 30 y 70 %. A partir de esta profundidad se mantuvo por encima del 90 %.

**- SM-2-(1):**

El sondeo SM-2-(1) cortó materiales argilíticos de color gris con algo de limonita. Los testigos aparecían muy fracturados hasta 1,70 m, punto a partir del cual la fracturación prácticamente desaparece con RQD superior al 80 % hasta el final del sondeo. La estratificación observada es subvertical, apareciendo alguna capa arenosa.

**- SP-1-(2):**

En el SP-1-(2) se cortó un nivel de argilita roja con intercalaciones de arenisca calcárea gris de aproximadamente 1 cm de espesor. Entre 12 y 16 m se atravesó el contacto entre la argilita y una caliza gris de grano fino. Este contacto se describió como liso y ondulado. En este tramo aparece alguna fractura rugosa con relleno de calcita y un buzamiento de unos 70°. A lo largo del sondeo la fracturación es escasa con RQD, en general, superior al 80 % a excepción del tramo entre 9,50 y 14 m en el que baja a porcentajes de entre 50 y 70 %.

**- SP-2-(2):**

El sondeo SP-2-(2) atravesó en toda su longitud un paquete de argilita roja. La fracturación es, igual que en el sondeo SP-1-(2), poco importante. Sin embargo, la presencia de planos de estratificación coincidentes con el eje del sondeo y que lo dividen por la mitad, dan a éste un aspecto de peor calidad. La maniobra correspondiente a la profundidad entre 2,05 y 3,60 m aparece muy fracturada debido a problemas en su ejecución.

**- SM-2-(2):**

En el sondeo SM-2-(2) se cortaron varios contactos entre diferentes litologías. Hasta los 2,70 m se cortó el contacto subvertical entre materiales margosos y calcareníticos. Desde 2,70 m hasta 6,50 m se extrajo una calcarenita gris con zonas en contacto con materiales margosos. Entre 6,50 m y 9,90 m se cortó una argilita roja con algo de limo en la que se observaron planos de estratificación y laminación lisos y brillantes con JRC de 0-2. Desde los 9,90 m y hasta el final del sondeo se cortó el contacto entre esta argilita y una calcarenita gris. Los materiales argilíticos presentaban una fracturación escasa con RQD cercanos al 100 %, mientras que los calcáneos (más rígidos) presentaban mayores grados de fracturación.

**- SP-1-(3):**

El SP-1-(3) atravesó niveles de calcarenita gris con abundante fracturación. El RQD varía a lo largo del sondeo entre 0 y 90 %. Se observaron planos de estratificación y laminación paralela subverticales lisos y con algo de relleno arenoso. La abundante fracturación produjo la inestabilidad de las paredes y obligó a perforar otro sondeo (SP-1-(3) BIS) para poder ejecutar ensayos presiométricos por debajo de 9 m.

**- SP-1-(3) BIS:**

En el sondeo SP-1-(3) BIS se comenzó la recuperación de testigo a los 9 m. Se perforaron calcarenitas grises con niveles de textura brechoide y abundantes venas de calcita. La estratificación, subvertical, es ondulada e irregular con niveles de materiales arcillosos margosos. En torno a los 15 m apareció un nivel brechificado con relleno terrígeno pardo-amarillento. El RQD medido fue muy variado a lo largo del sondeo, con niveles de 100 % y zonas de 0 %.

**- SP-2-(3):**

El SP-2-(3) tuvo que ser abandonado a los 5 m debido a la rotura en su interior de la sarta de perforación. Para poder continuar con los ensayos a más profundidad, hubo que perforar junto a éste otro sondeo denominado SP-2-(3) BIS.

**- SP-2-(3) BIS:**

El sondeo SP-2-(3) BIS cortó diferentes niveles de calcarenita con grados de fracturación muy variables. Destaca la zona entre 4 y 10 m que mostraba un RQD de 0 %. Entre 5 y 8 m se extrajo un material muy fracturado compuesto por bloques de calcarenita con matriz limoarenosa amarillenta que se ha descrito como brechas de falla. Entre 8,35 y 9,20 m podía seguirse el contacto entre la calcarenita gris y una calcarenita arcillosa amarillenta.

**- SM-2-(3):**

En el sondeo SM-2-(3) se cortó principalmente una calcarenita gris con un grado de fracturación medio-alto. La estratificación, subvertical, produce planos generalmente lisos, con rellenos arcillosos de hasta 1 cm en algún punto. Entre 3,0 y 3,8 m se corta una zona de falla con importante matriz arcillosa (25 % aproximadamente). El sondeo se termina a los 15,0 m.

## 4.2 Campaña de ensayos presiométricos

En esta campaña se obtuvieron datos de 43 ensayos presiométricos (Tabla 4-2), de los cuales 35 han sido recogidos en este trabajo. Los ensayos restantes se corresponden con repeticiones o ensayos fallidos y carecen de interés en este caso. Los ensayos recopilados se realizaron con un equipo con medida de deformación radial, de la marca comercial OYO, modelo Elastmeter HQ-4181.

Tabla 4-2. Resumen del número de ensayos presiométricos realizados.

Zona	Sondeos presiométricos	Ensayos	Ensayos repetidos	Total
1	2	13	6	19
2	2	11	2	13
3	4	11	0	11
TOTAL	8	35	8	43

A partir de las curvas presiométricas (Figura 4-4 a Figura 4-6) se han obtenidos los módulos de deformación (Tabla 4-3), tanto en la rama inicial ( $E_P$ ) como en los ciclos de descarga-recarga ( $E_R$ ), suponiendo un medio homogéneo e isótropo con un coeficiente de Poisson de 0,30 y empleado las ecuaciones habituales (ecuaciones 6-1 y 6-2).

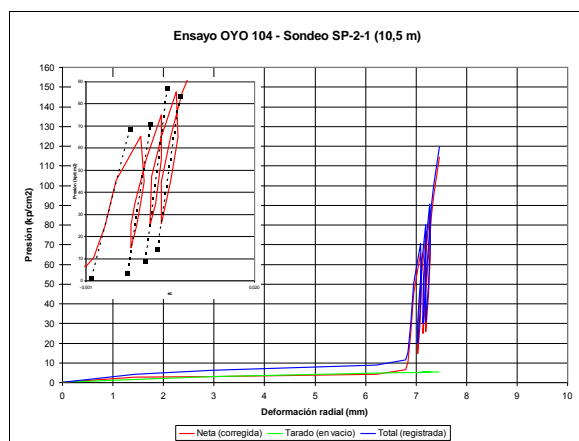


Figura 4-4. Ejemplo de curva presiométrica obtenida en el Flysch margo arenoso micáceo

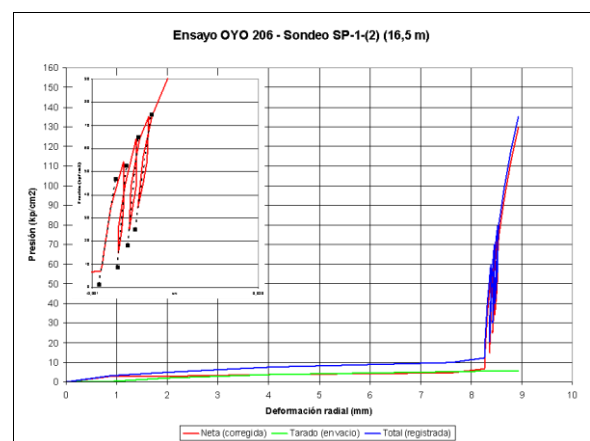


Figura 4-5. Ejemplo de curva presiométrica obtenida en las Pelitas rojas

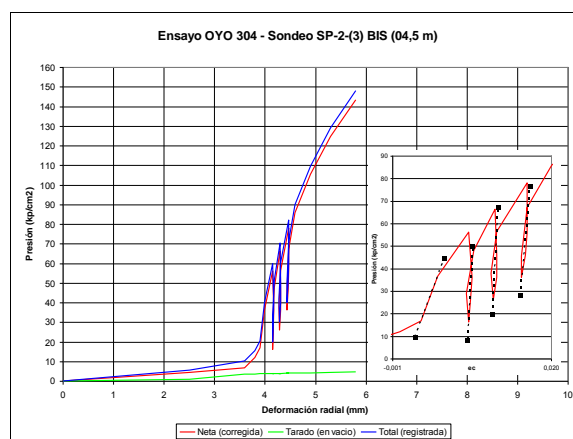


Figura 4-6. Ejemplo de curva presiométrica obtenida en el Flysch calcáreo

En cada uno de los puntos de realización de un ensayo presiométrico se determinaron las características geomecánicas del macizo rocoso. Estas determinaciones se realizaron a partir de las características de los testigos de sondeo, en los que se han estudiado las características de las discontinuidades y de la roca matriz. Otros parámetros como la continuidad de las discontinuidades, difícilmente observables en el testigo de un sondeo, fueron determinados, de manera general, a partir de la observación de las paredes de la galería. A partir de estas observaciones se calculó, entre otros índices, el Rock Mass Rating básico,  $RMR_b$  (Tabla 4-3).

Tabla 4-3. Resultados de los ensayos presiométricos tipo OYO y de la calidad geomecánica ( $RMR_b$ ) obtenida a partir de los sondeos.

Zona	Sondeo	Prof. (m)	Material	$RMR_b$	$E_p$ (MPa)	$E_R$ (MPa)
ZONA 1: Flysch margo- areniscoso- micáceo	SP-1-(1)	2,5	Argilita gris	57	2088	6214
		5,0	Argilita gris	62	2528	9262
		8,5	Argilita gris	62	3750	7889
		11,5	Argilita/Limolita	53	1442	2839
		14,5	Argilita/Limolita	47	1810	6136
		17,7	Argilita/Limolita	66	5333	9373
	SP-2-(1)	2,5	Agilita gris	51	1018	2823
		5,0	Agilita gris	50	728	2171
		7,5	Agilita gris	51	1264	1921
		10,5	Agilita gris	53	1831	2945
		12,5	Agilita gris	59	2994	4926
		16,5	Agilita gris	63	5014	14360
		19,5	Agilita gris	62	2970	-
ZONA 2: Pelitas Rojas	SP-1-(2)	2,5	Argilita roja	55	2185	2461
		5,2	Argilita roja	57	2545	3208
		7,5	Argilita roja	54	1092	1337
		16,5	Argilita roja	54	2867	4258
		18,5	Argilita roja	54	2144	14975
		19,5	Argilita roja	48	3476	-
	SP-2-(2)	2,9	Argilita roja	56	1335	8126
		5,5	Argilita roja	52	1238	2847
		8,5	Argilita roja	51	2178	3308
		11,5	Argilita roja	59	2022	3346
		14,7	Argilita roja	61	2147	4430
	SP-1-(3)	2,1	Calcarenita	34	4666	-
		4,5	Calcarenita	51	1386	9356
ZONA 3: Flysch calcáreo	SP-1-(3) BIS	10,0	Calcarenita	43	944	-
		15,6	Calcarenita	35	377	5665
		19,5	Calcarenita	26	508	5058
	SP-2-(3)	2,0	Calcarenita	29	1882	14580
		4,0	Calcarenita	43	1313	5516
	SP-2-(3) BIS	4,5	Calcarenita	34	1133	7554
		7,1	Nivel brechificado	27	420	3482
		11,7	Calcarenita	49	1994	-
		13,9	Calcarenita	45	963	7945

$RMR$ = Rock Mass Rating,  $E_p$ =Módulo presiométrico;  $E_R$ =Módulo presiométrico en recarga

En este estudio el módulo de deformación del macizo rocoso se calculó a partir del módulo presiométrico siguiendo la expresión propuesta por Ménard (1975):

$$E_C = \frac{E_P}{\alpha} \quad (4-1)$$

donde  $\alpha$  es un factor de corrección que tiene en cuenta la influencia de la trayectoria de tensiones y de los problemas de microdeformaciones. Los valores de  $\alpha$  dependen del tipo de terreno (Tabla 4-4) y han sido calculados a partir de observaciones empíricas para macizos rocosos.

Tabla 4-4. Valores del coeficiente  $\alpha$  (Ménard, 1975).

Rocas	Muy fracturadas	Sanas	Poco fracturadas o alteradas
$\alpha$	1/3	1/2	2/3

Con los datos obtenidos de los ensayos presiométricos y las descripciones de los sondeos se buscó una correlación entre la deformabilidad y las características geomecánicas del macizo rocoso del mismo modo que han hecho numerosos autores anteriormente (Bieniawski, 1978; Barton, 1983; Hoek y Brown, 1997). Tras el análisis de las posibles correlaciones recogido en el Apéndice I, se concluyó que el  $RMR_b$  (Tabla 4-3) era el parámetro que mejor correlacionaba con el módulo de deformación, obteniéndose la siguiente expresión (Muñiz Menéndez *et al.*, 2013) representada en la Figura 4-7, basada en las expresiones de Gokceoglu *et al.* (2003):

$$E_C = e^{\frac{RMR_b - 35}{18}} \quad (4-2)$$

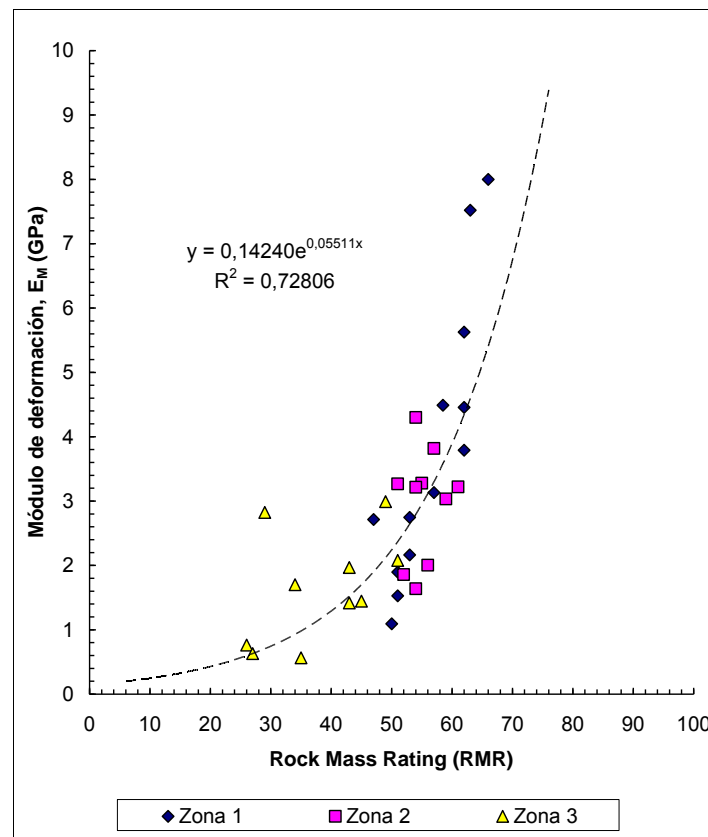


Figura 4-7. Correlación propuesta entre el RMR y el módulo de deformación del macizo rocoso para los materiales estudiados de la Unidad de Algeciras en la galería de Tarifa (Muñiz *et al.*, 2012).



### 4.3 Campaña de ensayos de laboratorio

En este punto se describen los ensayos de laboratorio realizados así como los principales resultados obtenidos.

#### 4.3.1 Tallado de muestras

Dada la estructura laminar que presenta la unidad de Algeciras, en esta campaña se estudió la influencia de esta estructura en el comportamiento resistente y deformacional de estos materiales.

A fin de estudiar la posible anisotropía, las muestras fueron talladas en tres direcciones en relación con los planos de estratificación. Las direcciones de tallado fueron las siguientes (Figura 4-8):

- Longitudinal: El eje de la muestra es paralelo al sondeo.
- Paralela: El eje de la muestra es perpendicular al del sondeo y paralelo a la dirección de estratificación.
- Perpendicular: El eje de la muestra es perpendicular al del sondeo y a la dirección de estratificación.

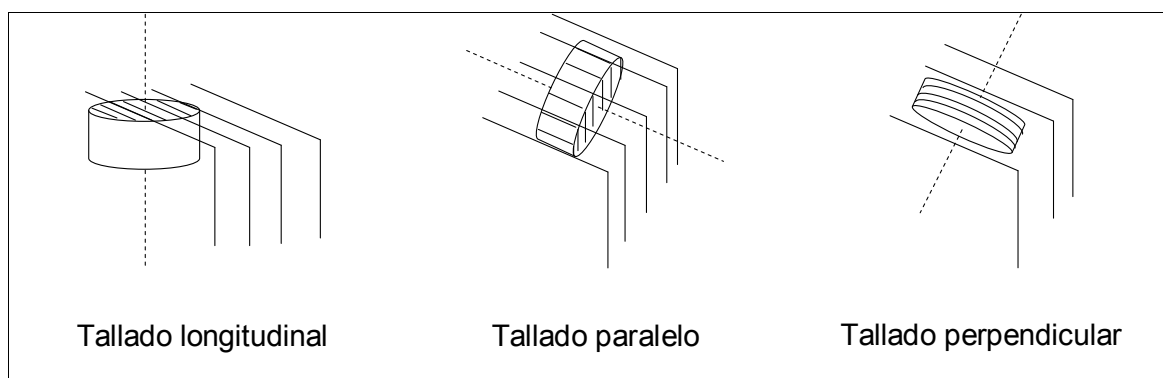


Figura 4-8: Esquemas de la dirección de tallado de las muestras en relación a la estratificación (CEDEX, 2012a).

En total se tallaron 85 probetas cilíndricas. El diámetro máximo de las muestras era de 76 mm impidiendo el tallado, en dirección paralela y perpendicular, de muestras con una relación altura/diámetro suficiente para satisfacer el valor de 2,5 indicado en la norma UNE 22950-1 (AENOR, 1990). Cuando la relación entre la longitud y el diámetro de las probetas era inferior a 2 se aplicó la corrección indicada por la norma NLT 250/91 (CEDEX, 1992b):

$$\sigma_{c,corr} = \frac{\sigma_c}{0,88 + \left(0,24 \cdot \frac{D}{H}\right)} \quad (4-3)$$

siendo:

$\sigma_{c,corr}$ : resistencia a compresión simple corregida.

$\sigma_c$ : resistencia a compresión simple obtenida en el ensayo.  
 D: diámetro de la probeta.  
 H: altura de la probeta.

#### 4.3.2 Ensayos de laboratorio realizados

Se ensayaron 12 testigos provenientes de los sondeos SM de las diferentes zonas, de los que se obtuvieron 137 muestras (Figura 4-9) entre probetas cilíndricas y muestras de otras formas (Tabla 4-5) con las que se realizaron un total de 637 ensayos (Tabla 4-6).



Figura 4-9. Ejemplo de probetas obtenidas de una muestra. M-6943.

Tabla 4-5: Muestras ensayadas.

Muestra	Unidad	Zona	Sondeo	Profundidad (m)	Material	Número de muestras
6939	Algeciras	1	SM-1-(1)	11,15 – 12,65	Argilita gris con algo de limo	9
6941				14,30 – 15,80	Argilita gris con algo de limo	9
6942				15,85 – 17,35	Argilita gris con algo de limo	12
6943				17,40 – 18,90	Argilita gris con algo de limo	17
6944				19,05 – 19,97	Argilita gris con algo de limo	10
6947		2	SM-1-(2)	4,65 – 6,20	Argilita roja con algo de limo	21
6948				6,20 – 7,70	Argilita roja con algo de limo	17
6953				12,85 – 13,65	Argilita roja con algo de limo	4
6954				13,65 – 15,15	Argilita roja con algo de limo	10
6961		3	SM-1-(3)	7,60 – 9,10	Calcarenita	20
6962				9,20 – 10,70	Calcarenita	7
6967				14,95 – 16,25	Calcarenita	1

Tabla 4-6: Ensayos de laboratorio realizados.

Grupo de ensayos	Ensayos	Nº de ensayos
Mineralógicos de identificación	Estudio con lupa binocular	15
	Difracción Rayos X	29
	Fluorescencia	23
Identificación y propiedades índice	Límites de Atterberg	2
	Humedad	87
	Densidad aparente	83

Grupo de ensayos	Ensayos	Nº de ensayos
	Densidad seca	80
	Peso específico	28
	Porosidad	61
	Absorción de agua	11
	Carbonatos	11
	Sulfatos	3
	Permeabilidad	4
	Compresión simple con y sin bandas	75
	Velocidad de ondas s y p	54
Resistencia y deformabilidad	Carga puntual	27
	Tracción indirecta	9
	Triaxial en célula Hoek	14
	Ensayo edométrico	19
Otros	Sequedad-humedad-desmoronamiento	2

De todos los ensayos realizados, los más interesantes en el contexto de este estudio son los que permiten conocer la resistencia y deformabilidad de los materiales (ensayos de resistencia a compresión simple y triaxial, edométricos, etc.).

En los ensayos de resistencia a compresión simple y triaxiales se puede medir la deformabilidad vertical de la muestra mediante varias vías, siendo las más habituales: a través del sensor colocado en el pistón de carga o mediante bandas extensométricas. La primera de las dos vías presenta el gran inconveniente de dar habitualmente medidas bastante superiores de deformación debido a causas como la propia deformabilidad del sistema, el error por acomodo e irregularidad de las bases de las probetas o el error por alteración de dichas bases, muy frecuente por muy cuidadoso que se haya realizado el tallado. Por tanto, para poder caracterizar con cierta fiabilidad la deformabilidad de los materiales es necesario realizar la medida de las deformaciones en la pared lateral de las probetas de roca que se ensayan, lo que se realiza habitualmente mediante la segunda vía con la colocación de bandas extensométricas en las paredes de los testigos a ensayar.

La adherencia de las bandas con la roca es fundamental para poder obtener una medida fiable de la deformación. Esta es más difícil de conseguir en rocas arcillosas (como son las de las Zonas 1 y 2), y prácticamente imposible si las rocas están húmedas. Por este motivo se siguió la siguiente metodología:

- Un grupo de muestras se ensayaron con su humedad natural y sin bandas extensométricas, por lo que la medida de la deformabilidad de estas muestras ha sido únicamente en sentido vertical a través de la lectura del pistón de carga.
- Un segundo grupo se secó al aire y se midió su deformación, tanto vertical como radial, mediante bandas extensométricas (dos verticales y dos horizontales colocadas diametralmente opuestas) y la deformación vertical mediante el pistón de carga como en el grupo anterior.

Este último grupo sirvió para el calibrado del equipo de medida, comparando las deformaciones reportadas por los dos sistemas.

Los ensayos de resistencia a compresión triaxial se han llevado a cabo en una célula triaxial tipo Hoek (Figura 4-10) que permite la colocación de bandas extensométricas en las paredes de los testigos y admite presiones de confinamiento de hasta 70 MPa. Esta célula triaxial está diseñada para muestras con un diámetro de 54 mm, por lo que únicamente se pudieron ensayar muestras de tallado longitudinal (véase apartado 4.3.1).

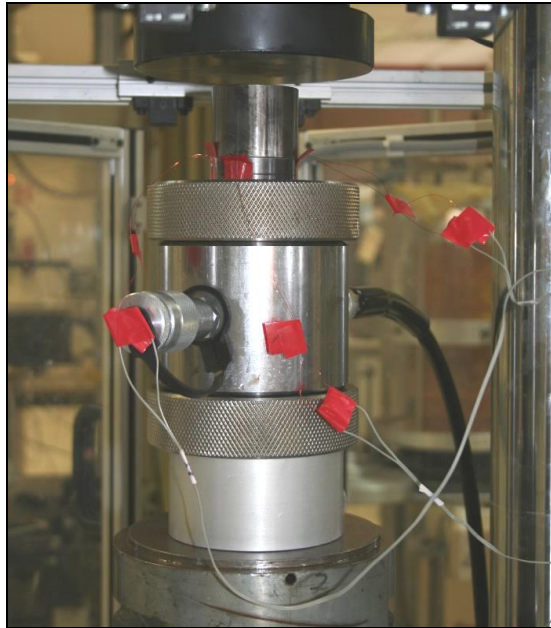


Figura 4-10. Célula triaxial tipo Hoek del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

Los ensayos edométricos, muy apropiados para medir la deformabilidad de los suelos, no lo son tanto en el caso de las rocas. Esto se debe a que la magnitud de las cargas aplicadas y la rigidez de las muestras hacen que la deformabilidad relativa del equipo tenga un efecto apreciable. Por otra parte, el tallado de las pastillas de ensayo produce una inevitable alteración en sus bases que hace que la deformabilidad medida sea mayor que la real, afectando al resultado de forma más notoria que en los ensayos de compresión debido a la menor altura de la muestra ensayada. En estos ensayos edométricos se ha realizado un calibrado de los equipos aplicando las mismas cargas a una pastilla metálica muy poco deformable con el fin de descontar la deformación correspondiente al sistema. A pesar de ello, de los resultados obtenidos se deducen unas deformabilidades muy elevadas, superiores a las obtenidas en las muestras de compresión simple, por lo que los resultados se han descartado para la obtención de módulos de deformación.

Además de los ensayos mencionados, se han realizado ensayos de tracción indirecta (ensayo brasileño), de carga puntual y de determinación de la velocidad de transmisión de las ondas de compresión ( $v_p$ ) y de corte ( $v_s$ ).

#### 4.3.3 Grado de anisotropía

A fin de medir el grado de anisotropía de las diferentes unidades, se compararon los resultados de varios ensayos de laboratorio en función de la dirección de medida. De entre los diversos métodos existentes para la cuantificación de esta característica se emplearon los siguientes criterios:

- **Índice VA (Tsidzi, 1997):**

$$VA = \frac{V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n}}{V_{media}} (\%) \quad (4-4)$$

siendo:

VA: anisotropía de la velocidad de transmisión de ondas p (*velocity anisotropy*).  
 $V_{\text{máx}}$ : la velocidad máxima de transmisión de ondas p.  
 $V_{\text{mín}}$ : la velocidad mínima de transmisión de ondas p.  
 $V_{\text{media}}$  es la velocidad media de transmisión de ondas p.

En función de este parámetro los materiales se clasifican según lo expuesto en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7: Clasificación de anisotropía según la velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas (Tsidzi, 1997).

Valor del índice VA	Descripción
< 2	Isótropa
2 – 6	Débilmente anisótropa
6 – 20	Moderadamente anisótropa
20 – 40	Altamente anisótropa
> 40	Muy altamente anisótropa

- **Índice  $I_{VP}$  (Saroglou y Tsiambaos, 2007):**

$$I_{V_p} = \frac{V_{p(0^\circ)}}{V_{p(90^\circ)}} \quad (4-5)$$

siendo:

$I_{VP}$ : Índice de anisotropía en la velocidad de ondas longitudinales (*velocity anisotropy index*).  
 $V_{p(0^\circ)}$ : máxima velocidad de las ondas longitudinales. Propagación de las ondas paralela a los planos de anisotropía.  
 $V_{p(90^\circ)}$ : mínima velocidad de las ondas longitudinales. Propagación de las ondas perpendicular a los planos.

Según el índice  $I_{VP}$  los materiales pueden clasificarse según lo recogido en la Tabla 4-8:

Tabla 4-8: Clasificación de anisotropía según la velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas (Saroglou y Tsiambaos, 2007).

Valor del índice $I_{VP}$	Descripción
1,0	Isótropa
>1,0 – 1,5	Débilmente anisótropa
1,5 – 2,0	Moderadamente anisótropa
> 2,0	Altamente anisótropa

- **Índice  $I_{\sigma_c}$  (Ramamurthy, 1993):**

$$I_{\sigma_c} = \frac{\sigma_{ci(90^\circ)}}{\sigma_{ci(mín)}} \quad (4-6)$$

siendo:

$I_{\sigma_c}$ : Índice de resistencia anisótropa (*strength anisotropy index*).  
 $\sigma_{ci(90^\circ)}$ : resistencia a compresión simple máxima, que se produce cuando la dirección de la carga es perpendicular a los planos de anisotropía.  
 $\sigma_{ci(mín)}$ : resistencia a compresión simple mínima, que se produce cuando la dirección de la carga y los planos de anisotropía forman unos  $45^\circ + \phi/2$ .

Según este valor, el grado de anisotropía de los materiales puede clasificarse según lo expuesto en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9: Clasificación de anisotropía según la resistencia a compresión simple (Ramamurthy, 1993).

Valor del índice $I_{\sigma c}$	Descripción
1,0-1,1	Isótropa
1,1-2,0	Débilmente anisótropa
2,0-4,0	Moderadamente anisótropa
4,0-6,0	Altamente anisótropa
> 6,0	Muy altamente anisótropa

Dada la dificultad que presenta el tallado de estas muestras debido a su fisibilidad, en el estudio realizado no se tallaron muestras con los planos a  $45^\circ + \phi/2$  (Angulo teórico de mínima resistencia) por lo que no se puede obtener el valor de este índice. Sin embargo, se ha empleado un límite inferior del mismo, dado por la relación entre la máxima y la mínima resistencia a compresión simple obtenidas.

#### 4.3.4 Principales resultados de los ensayos de laboratorio

A continuación se presentan los resultados más destacados de esta campaña de ensayos de laboratorio para cada litología estudiada dentro de la Unidad de Algeciras: flysch margo-arenisco-micáceo (Zona 1), pelitas rojas (Zona 2) y flysch calcáreo (Zona 3).

##### 4.3.4.1 Zona 1: Flysch margo-arenisco-micáceo

#### a. Ensayos de identificación y propiedades índice

En la Tabla 4-10 se recogen los valores medios obtenidos de los ensayos de identificación y propiedades índice realizados en las muestras indicadas.

Tabla 4-10: Resumen de los resultados de los ensayos de identificación y propiedades índice en el Flysch margo-arenisco-micáceo (Zona 1).

Muestra	$\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_d$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_s$ ( $\text{kN/m}^3$ )	n (%)	Abs. (%)	w (%)	$s_r$ (%)	LL	LP	IP	CaCO <sub>3</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)
6939	24,36	22,97	27,8	15,5	7,7	6,2	88,4	-	-	-	-	-
6941	24,95	24,14	28,0	11,7	5,2	4,4	86,3	-	-	-	-	-
6942	-	24,65	27,8	9,9	4,0	-	-	-	-	-	21,4	-
6943	25,41	24,68	27,9	9,9	4,2	3,8	92,6	25,9	17,3	8,6	17,1	0,07
6944	-	-	27,8	8,8	3,5	-	-	-	-	-	10,8	-

$\gamma$ : peso específico aparente con humedad natural;  $\gamma_d$ : peso específico seco;  $\gamma_s$ : peso específico de las partículas sólidas; n: porosidad; Abs.: absorción; w: humedad natural;  $s_r$ : grado de saturación; LL: límite líquido; LP: límite plástico; IP: índice de plasticidad; CaCO<sub>3</sub>: contenido en carbonato cálcico; SO<sub>3</sub>: contenido en sulfatos, expresado en SO<sub>3</sub>.

Aunque el grado de saturación obtenido con las muestras inalteradas sin desecar no es del 100 %, es de esperar que *in situ* sí lo sea ya que el terreno se encuentra bajo el nivel freático.

## b. Ensayos de resistencia y deformabilidad

En estos materiales se han tallado un total de 41 probetas para realizar ensayos de compresión, 23 de ellas en sentido longitudinal, 9 en sentido paralelo y otras 9 en sentido perpendicular. Los principales resultados se resumen en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11: Resultados de los ensayos de resistencia a compresión simple (RCS) y triaxial, de los ensayos de deformabilidad y de los ensayos de determinación de la velocidad de transmisión de las ondas de compresión ( $v_p$ ) y de corte ( $v_s$ ) en el flysch margo-arenisco-micáceo (Zona 1).

Muestra	Tallado	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	RCS (MPa)	Triaxial		$E_1$ (MPa)	$E_3$ (MPa)	$\nu$	$v_p$ (m/s)	$v_s$ (m/s)
						$\sigma_1$	$\sigma_3$					
6939-IX	Long.	23,9	22,3	7,0	5,1	-	-	633	-	-	2920	1077
6939-VII	Long.	24,1	23,4	2,8	18,7	-	-	4718	15676	-	2888	1380
6939-VIII	Long.	24,1	22,6	6,9	5,6	-	-	588	-	-	2948	1440
6941-IX	Long.	25,3	24,5	3,5	11,3	-	-	1655	-	-	4096	1389
6941-VII	Long.	24,9	24,7	1,2	27,9	-	-	3638	-	-	3667	1141
6941-VIII	Long.	24,2	23,1	4,8	7,3	-	-	715	-	-	3256	1029
6942-I	Long.	24,6	24,3	1,3	-	42,5	3,0	5405	8668	0,22	3527	1457
6942-II	Long.	25,3	25,0	1,1	-	62,2	6,1	6455	8620	0,14	4171	1413
6942-III	Long.	25,2	-	-	21,0	-	-	6902	8540	0,23	4027	1532
6942-IV	Long.	25,4	-	-	17,2	-	-	2363	-	-	4643	1302
6942-V	Long.	25,2	-	-	8,2	-	-	11756	29329	0,46	4285	1638
6943-I	Long.	25,1	-	-	11,3	-	-	16990	13798	0,24	4046	1293
6943-II	Long.	25,4	24,5	3,8	-	-	-	-	-	-	3246	1953
6943-III	Long.	24,8	-	-	16,8	-	-	1303	26227	0,43	4825	1780
6943-IV	Long.	25,1	24,8	1,2	-	81,5	9,0	7414	9338	0,18	3909	2505
6943-V	Long.	25,0	24,7	1,2	-	88,1	12,1	8145	10569	0,3	3945	1603
6943-VI	Long.	25,1	-	-	-	-	-	-	-	-	3907	1744
6943-VIII	Long.	24,6	-	-	17,5	-	-	4908	6436	0,40	4162	2062
6944-I	Long.	25,5	-	-	32,0	-	-	7268	7856	0,35	4169	1436
6944-IV	Long.	25,4	-	-	29,6	-	-	4541	8447	0,25	4436	1190
6944-V	Long.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4269	1881
6944-X	Long.	25,3	-	-	19,2	-	-	4145	9017	0,50	4263	1356
6939-IV	Paral.	26,1	25,7	1,7	18,2	-	-	3296	8237	-	3364	1261
6939-V	Paral.	24,1	22,5	6,9	5,7	-	-	627	-	-	2990	1495
6939-VI	Paral.	24,0	22,5	6,8	8,1	-	-	800	-	-	3158	1224
6941-I	Paral.	24,7	24,3	1,4	26,4	-	-	5250	-	-	3567	1493
6941-II	Paral.	24,7	23,3	5,7	8,1	-	-	876	-	-	3715	1365
6941-III	Paral.	25,0	24,0	4,1	10,2	-	-	1480	-	-	4087	1269
6942-VII	Paral.	25,5	-	-	8,7	-	-	3702	8097	0,41	4354	1370
6943-IX	Paral.	24,6	-	-	13,9	-	-	2934	3015	0,22	3731	984
6944-IX	Paral.	25,0	-	-	19,7	-	-	2756	6437	0,30	4348	1335
6939-I	Perp.	24,6	24,2	1,4	21,7	-	-	2506	2954	0,16	2929	992
6939-II	Perp.	24,2	22,6	7,1	5,0	-	-	169	-	-	2455	675
6939-III	Perp.	24,1	22,6	6,7	5,3	-	-	178	-	-	2568	657
6941-IV	Perp.	25,1	24,8	1,0	35,1	-	-	4585	5707	-	3491	1085
6941-V	Perp.	25,2	24,1	4,3	9,6	-	-	1152	-	-	3506	1070
6941-VI	Perp.	25,3	24,4	3,8	15,5	-	-	1706	-	-	3808	1291
6942-VI	Perp.	25,4	-	-	28,1	-	-	5848	7165	0,10	4070	1308
6943-X	Perp.	24,7	-	-	24,2	-	-	2719	3513	0,30	3366	1062
6944-VIII	Perp.	25,1	-	-	24,1	-	-	2226	3744	0,35	4032	1229

$\gamma$ : peso específico aparente con humedad natural;  $\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad natural; RCS: resistencia a compresión simple;  $\sigma_1$ : tensión vertical de rotura (MPa);  $\sigma_3$ : Presión de confinamiento (MPa);  $E_1$ : módulo de deformación medido en la parte lineal de la curva del pistón;  $E_3$ : módulo de deformación en la parte lineal de las curvas de las dos bandas extensométricas longitudinales;  $\nu$ : coeficiente de Poisson;  $v_p$ : velocidad de propagación de las ondas longitudinales;  $v_s$ : velocidad de propagación de las ondas transversales.

A partir de los resultados de resistencia a compresión simple (RCS) y triaxial se ha podido ajustar el criterio de rotura de Hoek y Brown (Hoek *et al.*, 2002), obteniéndose un valor de  $m_i$  de 26,5 y una resistencia a compresión simple de 18,4 MPa (Figura 4-11).

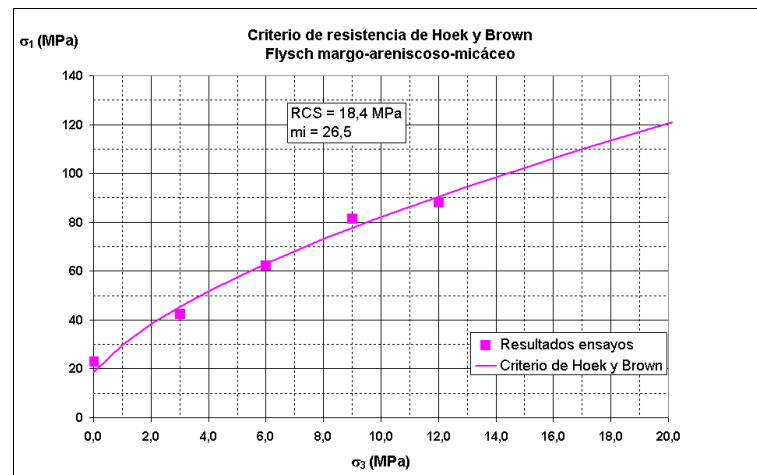


Figura 4-11: Resistencia triaxial del flysch margo-areniscoso-micáceo (muestras desecadas) según el criterio de rotura de Hoek y Brown (CEDEX, 2012a).

Se observó una relación entre la humedad de las muestras y su anisotropía. Mientras que en las muestras desecadas se observó una mayor resistencia a compresión simple en las probetas talladas en dirección perpendicular a la laminación, en las muestras con humedad cercana a la natural fueron las muestras con tallado paralelo las que mostraron, de media, una mayor resistencia a compresión. En el caso de la deformabilidad, la dirección perpendicular resultó la más deformable tanto en muestras con humedad natural como en muestras desecadas si bien, en estas últimas la diferencia observada fue mayor.

La humedad influye, al igual que en la anisotropía, en la resistencia de las muestras (Figura 4-16). Entre las probetas con tallado longitudinal se observó una resistencia 3,1 veces superior en muestras desecadas respecto a la medida en muestras con humedades mayores. En función de esta relación obtenida y suponiéndola constante, se estimó, a partir de la curva de la envolvente de rotura de Hoek y Brown obtenida para muestras desecadas (Figura 4-11), la envolvente correspondiente al material con humedad natural (Figura 4-12). Los valores obtenidos en este caso fueron un  $m_i$  de 3,3 y una resistencia a compresión simple de 7,0 MPa.

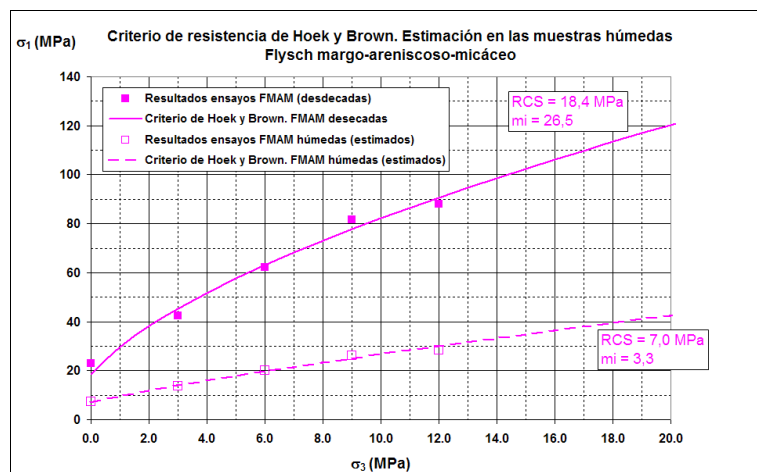


Figura 4-12: Curva de resistencia según el criterio de rotura de Hoek y Brown estimada para las muestras con humedad natural en el flysch margo-areniscoso-micáceo (CEDEX, 2012a).

Utilizando los criterios descritos en el apartado 4.3.3, se ha cuantificado el grado de anisotropía de estos materiales. Según el método de Tsidzi (1997) el valor del VA es de 11,5 para las



muestras con grado de saturación elevado y 12,5 para las muestras desecadas. Esto clasifica estos materiales como moderadamente anisótropos (Tabla 4-7). Según el criterio de Saroglou y Tsiambaos (2007) el índice  $I_{VP}$  es de 1,14 y 1,12 para las muestras con grado de saturación inferior y superior al 50 %, respectivamente, lo que lo clasifica como débilmente anisótropo (Tabla 4-8). En este trabajo no se tallaron muestras con planos a 30° y por tanto no se pudo calcular el  $I_{\sigma_c}$  (Ramamurthy, 1993). Como límite inferior del mismo se calculó la relación entre la máxima y la mínima resistencia a compresión simple obtenidas. Esta relación fue de 1,55 para las muestras desecadas y 1,21 para aquella con grado de saturación superior al 50 %. Haciendo esto este material se clasificaría, al menos, como débilmente anisótropo (Tabla 4-9).

Los principales resultados de los ensayos edométricos realizados con las muestras procedentes de la Zona 1, flysch margo-areniscoso-micáceo, se resumen en la Tabla 4-12.

Tabla 4-12: Resultados de los ensayos edométricos realizados en el flysch margo-areniscoso-micáceo (Zona 1).

Nº muestra	Tallado	$\omega_{inicial}$ (%)	$\omega_{final}$ (%)	$\gamma_d$ inicial (kg/m³)	$\gamma_d$ final (kg/m³)	G	$h_0$ (mm)	$e_0$	$e_f$	$C_c$	$C_s$	$p_h$ (kPa)
6943-VII	Long.	7,0	8,9	2,443	2,486	2,76	20	0,130	0,110	0,0184	0,0032	82,4
6943-XI	Paral.	6,6	8,6	2,281	2,317	2,76	20	0,210	0,191	0,0305	0,0033	196,2
6943-XII	Perp.	6,3	7,6	2,257	2,253	2,76	20	0,223	0,225	0,0376	0,0137	438,5
6944-III	Long.	6,8	8,5	2,363	2,498	2,76	19,8	0,168	0,105	0,0338	0,0086	no
6944-VI	Perp.	6,3	7,8	2,351	2,351	2,76	19,5	0,174	0,174	0,0106	0,0036	366,9
6944-VII	Paral.	6,8	8,6	2,480	2,407	2,77	20	0,117	0,151	0,0172	0,0015	no

$\omega_{inicial}$ : humedad inicial;  $\omega_{final}$ : humedad final;  $\gamma_d$  inicial: densidad seca inicial;  $\gamma_d$  final: densidad seca final; G: peso específico de las partículas sólidas;  $h_0$ : altura inicial;  $e_0$ : índice de poros inicial;  $e_f$ : índice de poros final;  $C_c$ : índice de compresión;  $C_s$ : índice de entumecimiento;  $p_h$ : presión de hinchamiento. \* Este valor no es real, ya que la muestra hinchó libremente antes de colocar la presión.

Si se calculan los módulos edométricos a partir de los resultados de estos ensayos se obtienen unos valores muy inferiores a los que podrían estimarse a partir de los ensayos de compresión simple, lo que puede deberse al reblandecimiento de las caras de las pastillas, por penetración de agua en las fisuras formadas por retracción, etc. Se ha descartado la obtención de estos módulos edométricos por considerarse poco realistas.

Los resultados de los ensayos de resistencia a tracción y a carga puntual realizados con las muestras procedentes de la Zona 1, flysch margo-areniscoso-micáceo, se resumen en la Tabla 4-13. Estos resultados presentan unas dispersiones bastante elevadas. Sería necesario un número de muestras superior al disponible para poder obtener alguna correlación de resultados.

Tabla 4-13: Resultados de los ensayos de resistencia a tracción (ensayo brasileño) y a carga puntual en el flysch margo-areniscoso-micáceo (Zona 1).

Nº muestra	Tallado	$\gamma$ (kN/m³)	$\omega$ (%)	$\sigma_t$ (MPa)	$I_{s50}$ (MPa)	Aplicación de la carga
6942-D	Long.	-	-	-	0,46	Longitudinal
6943-B	Long.	-	-	-	1,36	Longitudinal
6942-B	Long.	-	-	-	0,48	Paralela
6944-II	Long.	-	-	-	0,26	Paralela
6944-V	Long.	25,6	3,61	1,74	0,75	Paralela
6942-B1	Long.	-	-	-	0,72	Perpendicular
6942-B2	Long.	-	-	-	1,23	Perpendicular
6943-B1	Long.	-	-	-	0,79	Perpendicular
6943-B2	Long.	-	-	-	1,95	Perpendicular
6943-C1	Long.	-	-	-	1,59	Perpendicular
6943-C2	Long.	-	-	-	2,04	Perpendicular
6942-E	Paral.	-	-	-	1,16	Perpendicular
6943-A	Paral.	-	-	-	0,37	Perpendicular
6943-XIII	Perp.	21,9	4,6	1,51	-	Longitudinal

### c. Otros ensayos

Otros ensayos realizados en una única muestra son los siguientes:

- Ensayo de durabilidad (CEDEX, 1992c), o de sequedad-humedad-desmoronamiento (SEHUDES), del que se obtienen los datos de la Tabla 4-14.

Tabla 4-14: Resultados del ensayo SEHUDES en la Zona 1 (flysch margo-areniscoso-micáceo).

Nº muestra	Índice 1 <sup>er</sup> ciclo	Índice 2º ciclo
6942	98,0	96,3
	97,9	96,8

A partir de estos resultados el material se puede calificar, de acuerdo con Franklin y Chandra (1972), como de “durabilidad alta”.

- Ensayo de permeabilidad en célula triaxial, cuyo resultado se recoge en la Tabla 4-15.

Tabla 4-15: Resultados del ensayo de permeabilidad en la Zona 1 (flysch margo-areniscoso-micáceo).

Nº muestra	$\sigma'_3$ (MPa)	$p_1-p_2$ (MPa)	k (cm/s)
6943	0,69	0,59	$2,2 \cdot 10^{-9}$
	1,08	1,76	$5,1 \cdot 10^{-10}$

$\sigma'_3$ : la presión de confinamiento en el ensayo;  $p_1-p_2$ : la diferencia de presión entre la entrada y la salida de agua; k: coeficiente de permeabilidad

Estos resultados indican que la roca matriz del flysch margo-areniscoso-micáceo es prácticamente impermeable.

#### 4.3.4.2 Zona 2: Pelitas Rojas

##### a. Ensayos de identificación y propiedades índice

En la Tabla 4-16 se recogen los valores medios obtenidos de los ensayos de identificación y propiedades índice realizados:

Tabla 4-16: Resumen de los resultados de los ensayos de identificación y propiedades índice en las pelitas rojas (Zona 2).

Nº muestra	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$G_s$	n (%)	Abs. (%)	$\omega$ (%)	$S_r$ (%)	LL	LP	IP	CaCO <sub>3</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)
6947	23,74	23,21	2,77	14,5	7,7	5,3	70,6	-	-	-	-	-
6948	24,13	23,03	2,75	15,3	6,6	5,9	83,7	-	-	-	-	-
6952	24,45	23,10	2,82	15,7	7,3	5,2	84,0	-	-	-	-	-
6953	-	22,71	2,79	16,9	7,3	-	-	29,0	17,6	11,5	13,0	0,07

$\gamma$ : peso específico aparente con humedad natural.  $\gamma_d$ : peso específico seco;  $G_s$ : peso específico relativo de las partículas sólidas; n: porosidad; Abs.: absorción;  $\omega$ : humedad natural;  $S_r$ : grado de saturación; LL: límite líquido; LP: límite plástico; IP: índice de plasticidad; CaCO<sub>3</sub>: contenido en carbonato cálcico; SO<sub>3</sub>: contenido en sulfatos, expresado en SO<sub>3</sub>.

Aunque el grado de saturación obtenido con las muestras inalteradas sin desecar no es del 100 %, es de esperar que *in situ* sí lo sea ya que el terreno se encuentra bajo el nivel freático.

##### b. Ensayos de resistencia y deformabilidad

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión simple (RCS) y triaxial, de los ensayos de deformabilidad y de los ensayos de determinación de la velocidad de transmisión de las ondas de compresión ( $v_p$ ) y de corte ( $v_s$ ) realizados con las muestras de pelitas rojas se resumen en la Tabla 4-17.

Tabla 4-17: Resultados de los ensayos de resistencia y deformabilidad en las Pelitas Rojas (Zona 2).

Muestra	Tallado	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	RCS (MPa)	Triaxial		$E_1$ (MPa)	$E_3$ (MPa)	$\nu$	$v_p$ (m/s)	$v_s$ (m/s)
						$\sigma_1$	$\sigma_3$					
6952-I	Long.	24,4	23,1	5,7	-	14,3	3,0	1158	-	-	2959	978
6952-II	Long.	24,8	23,6	5,0	-	24,0	6,0	2107	-	-	2837	906
6952-III	Long.	25,1	-	1,8	-	-	-	-	-	-	2975	1242
6952-IV	Long.	24,2	23,0	5,1	-	29,9	12,0	2695	-	-	2872	1034
6947-I	Long.	23,7	23,3	1,7	15,7	-	-	3831	3426	0,08	2905	1490
6947-II	Long.	23,7	22,5	5,3	-	-	-	-	-	-	-	-
6947-III	Long.	23,9	23,5	1,9	17,2	-	-	3960	5845	0,14	3779	1176
6947-IV	Long.	24,0	23,6	1,8	18,0	-	-	4045	4787	0,22	3265	928
6947-VI	Long.	24,2	23,9	1,5	17,9	-	-	3544	4623	-	3109	1093
6947-VII	Long.	23,8	23,5	1,6	16,6	-	-	3344	4665	0,23	3100	1172
6947-XIV	Long.	24,0	22,3	1,8	18,0	-	-	4045	4787	0,22	3265	928
6948-IX	Long.	24,1	22,7	5,8	7,4	-	-	1124	-	-	-	-
6948-VII	Long.	24,1	23,6	2,1	18,8	-	-	3008	-	-	2848	1125
6948-VIII	Long.	24,1	22,9	5,5	7,6	-	-	908	-	-	-	-
6948-X	Long.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6953-I	Long.	24,4	-	-	12,5	-	-	2755	2554	0,20	3216	1178
6953-II	Long.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6953-III	Long.	24,6	-	-	18,6	-	-	2334	3818	0,40	3405	1055
6953-VI	Long.	24,4	-	-	14,3	-	-	3397	3805	0,23	3458	1162
6947-X	Paral.	24,3	23,8	2,2	10,7	-	-	2047	2724	0,38	3132	860
6948-I	Paral.	24,3	22,8	6,4	6,5	-	-	1043	-	-	-	-
6948-II	Paral.	24,3	23,7	2,3	10,6	-	-	2769	-	-	3111	1000
6948-III	Paral.	24,3	22,9	5,9	8,5	-	-	1283	-	-	-	-
6953-IV	Paral.	24,5	-	-	16,3	-	-	3272	6069	0,60	3513	1127
6947-IX	Perpr.	24,2	23,7	2,1	17,4	-	-	1712	1958	0,50	3393	816
6947-VIII	Perpr.	24,2	23,7	2,0	12,8	-	-	1190	1314	0,21	3100	851
6948-IV	Perpr.	24,2	23,7	2,1	21,1	-	-	2537	2716	-	-	841
6948-V	Perpr.	24,0	22,6	5,9	5,8	-	-	401	-	-	-	-
6948-VI	Perpr.	24,1	22,8	6,0	4,3	-	-	306	-	-	-	-
6953-V	Perpr.	-	-	-	18,0	-	-	2120	2489	0,20	3018	940
6953-VII	Perpr.	-	-	-	24,8	-	-	3173	5347	0,60	2966	972

$\gamma$ : peso específico aparente con humedad natural;  $\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad natural; RCS: resistencia a compresión simple;  $\sigma_1$ : tensión vertical de rotura (MPa);  $\sigma_3$ : Presión de confinamiento (MPa);  $E_1$ : módulo de deformación medido en la parte lineal de la curva del pistón;  $E_3$ : módulo de deformación en la parte lineal de las curvas de las dos bandas extensométricas longitudinales;  $\nu$ : coeficiente de Poisson;  $v_p$ : velocidad de propagación de las ondas longitudinales;  $v_s$ : velocidad de propagación de las ondas transversales.

Con los resultados de los ensayos de resistencia a compresión triaxial se ha ajustado el criterio de rotura de Hoek y Brown de estos materiales con las humedades cercanas a saturación (Tabla 4-12), obteniéndose un valor de  $m_i$  de 4,4 y una resistencia a compresión simple de 6,9 MPa (Figura 4-13).

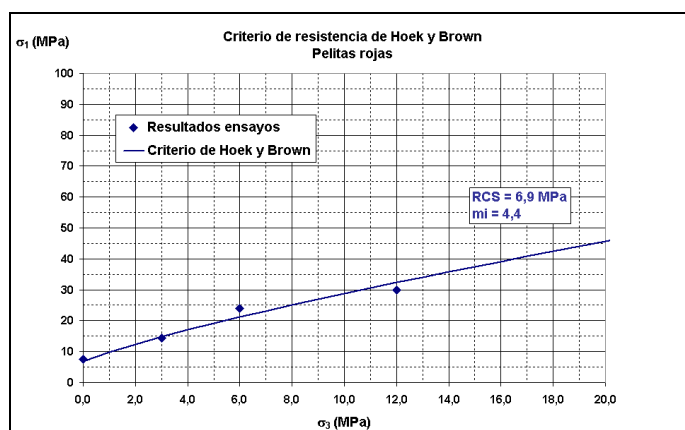


Figura 4-13: Resistencia triaxial de las pelitas rojas (muestras húmedas) según el criterio de rotura de Hoek y Brown.

Utilizando los criterios descritos en el apartado 4.3.3 se ha cuantificado el grado de anisotropía de estos materiales. Según el método de Tsidzi (1997) el valor del VA es de 4,1 para las muestras desecadas, clasificando estos materiales como débilmente anisótropos (Tabla 4-7). Según el criterio de Saroglou y Tsiambaos (2007) el índice  $I_{VP}$  es de 1,04 para las muestras con grado de saturación inferior al 50 %, lo que clasifica a estas rocas como débilmente anisótropas (Tabla 4-8).

Con las muestras de estos materiales se han realizado nueve ensayos edométricos (Tabla 4-18).

Tabla 4-18: Resultados de los ensayos edométricos realizados en las Pelitas Rojas (Zona 2).

Muestra	Tallado	$\omega_{\text{inicial}}$ (%)	$\omega_{\text{final}}$ (%)	$\gamma_{d \text{ inicial}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{d \text{ final}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	G	$h_0$ (mm)	$e_0$	$e_f$	$C_c$	$C_s$	$p_h$ (kPa)
6947-XI	Long.	7,0	8,9	21,30	21,68	2,73	19,2	0,282	0,261	0,0425	0,0081	35,32
6947-XII	Paral.	6,6	8,6	22,24	22,71	2,73	19,1	0,228	0,216	0,0241	0,0066	58,86
6947-XIII	Perp.	6,3	7,6	22,19	22,32	2,73	20	0,230	0,228	0,0300	0,0098	130,47
6948-XII	Perp.	6,8	8,5	22,61	22,89	2,72	20	0,203	0,19	0,0467	0,0149	105,95
6948-XIV	Paral.	6,3	7,8	23,15	23,74	2,72	20	0,175	0,149	0,0235	0,0046	-
6948-XV	Long.	6,8	8,6	22,45	22,74	2,74	20	0,220	0,207	0,0273	0,0068	35,32
6953-II	Long.	4,1	7,9	22,86	23,13	2,75	20	0,203	0,191	0,0174	0,0048	-
6953-IX	Perp.	4,6	8,4	22,06	23,07	2,75	20	0,247	0,196	0,0425	0,0112	-
6953-X	Paral.	3,8	6,8	23,82	23,61	2,75	20	0,154	0,175	0,0036	0,0007	912,33*

$\omega_{\text{inicial}}$ : humedad inicial;  $\omega_{\text{final}}$ : humedad final;  $\gamma_{d \text{ inicial}}$ : densidad seca inicial;  $\gamma_{d \text{ final}}$ : densidad seca final; G: peso específico de las partículas sólidas;  $h_0$ : altura inicial;  $e_0$ : índice de poros inicial;  $e_f$ : índice de poros final;  $C_c$ : índice de compresión;  $C_s$ : índice de entumecimiento;  $p_h$ : presión de hinchamiento. \* Este valor no es real, ya que la muestra hinchó libremente antes de colocar la presión.

Se observa que las muestras de tallado perpendicular son las de mayores índices de compresión y entumecimiento, así como las que presentan mayor presión de hinchamiento. Es decir, las muestras presentan un mayor hinchamiento y mayor deformabilidad en la dirección perpendicular a las capas, como parece lógico que debe ocurrir. Al igual que ocurría en la Zona 1, si se calculan los módulos edométricos a partir de los resultados de estos ensayos se obtienen unos valores muy inferiores a los que podrían estimarse a partir de los ensayos de resistencia a compresión simple, lo que puede deberse a reblandecimiento de las caras de las pastillas, por penetración de agua en las fisuras formadas por retracción, etc. Se ha descartado la obtención de estos módulos edométricos por considerarse poco realistas.

Los resultados de los ensayos de resistencia a tracción y a carga puntual realizados con las muestras procedentes de la Zona 2 se resumen en la Tabla 4-13.

Tabla 4-19: Resultados de los ensayos de resistencia a tracción (ensayo brasileño) y a carga puntual en las pelitas rojas (Zona 2).

Nº muestra	Tallado	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	$\sigma_t$ (MPa)	$I_{S50}$ (MPa)	Aplicación de la carga	Tipo de ensayo
6947-V	Long.	24,2	7,54	0,56	-	Perpendicular	Brasileño
6947-XV	Long.	23,6	6,78	0,56	-	Paralela	Brasileño
6947-B	Long.	-	-	-	0,07	Longitudinal	PLT Axial
6948-XIII	Long.	23,8	6,33	0,59	-	Perpendicular	Brasileño
6953-VIII	Long.	-	-	-	0,46	Paralela	PLT Diametral
6947-C	Paral.	-	-	-	0,22	Paralela	PLT Axial
6947-D	Paral.	-	-	-	0,47	Paralela	PLT Axial
6947-E	Paral.	-	-	-	0,06	Paralela	PLT Axial
6948-XI	Paral.	24,5	5,78	0,74	-	Perpendicular	Brasileño

$\gamma$ : densidad aparente de la muestra;  $\omega$ : humedad de la muestra;  $\sigma_t$ : resistencia a tracción indirecta;  $I_{S50}$ : índice de carga puntual normalizado para 50 mm

Estos resultados presentan unas elevadas dispersiones. Para poder obtener alguna correlación de resultados sería preciso completarlos con un número de muestras muy superior.

En estos materiales se realizaron ensayos de corte directo en junta (Figura 4-14) con el principal objetivo de obtener los parámetros de deformabilidad tangencial de los planos de discontinuidad (Tabla 4-20).



Figura 4-14. Muestra 6950-A antes de rotura

Tabla 4-20. Resultados de los ensayos de corte directo en discontinuidades realizados en las pelitas rojas

Nº muestra	$\sigma_n$ pico (MPa)	$\tau$ pico (MPa)	$k_s$ (MPa/m)
6886A	1,03	0,86	656
6886A	1,03	1,04	631
6886B	2,55	2,23	688
6886B	2,62	1,89	632
6886B	5,23	3,26	764
6886C	4,76	3,07	850
6949-I	0,74	1,287	1005
6949-II	3,23	2,088	1140

El valor promedio del  $k_s$  es de 800 MPa/m.

Estos ensayos también sirvieron para estimar los parámetros resistentes pico de estas discontinuidades. Según el ajuste lineal que se realizó (Figura 4-15) se obtuvieron unos valores de  $c = 0,63$  MPa y de  $\phi = 27^\circ$ .

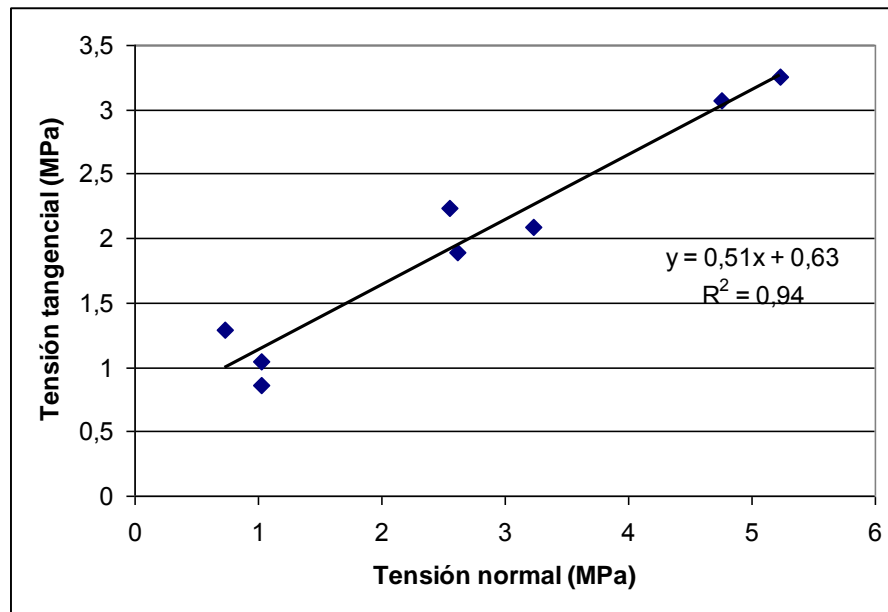


Figura 4-15. Ajuste lineal de los resultados de resistencia al corte directo en junta de las muestras de pelitas rojas (zona 2).

### c. Otros ensayos

Con la muestra 6952 se realizó un ensayo de durabilidad o SEHUDES (CEDEX, 1992c). A partir de los resultados (Tabla 4-21) el material se puede calificar, de acuerdo con Franklin y Chandra (1972) como de “durabilidad media”.

Tabla 4-21: Resultados del ensayo SEHUDES en la Zona 2

Nº muestra	Índice 1º ciclo	Índice 2º ciclo
6952	86,7	64,2

Con la muestra 6947-II se ha realizado un ensayo de permeabilidad en célula triaxial (Tabla 4-22). Estos resultados indican que la roca matriz de las pelitas rojas es prácticamente impermeable.

Tabla 4-22: Resultados del ensayo de permeabilidad en la Zona 2 (pelitas rojas)

Nº muestra	$\sigma'_3$ (MPa)	$p_1-p_2$ (MPa)	k (cm/s)
6947-II	0,78	1,18	$4,7 \cdot 10^{-10}$

$\sigma'_3$ : presión de confinamiento;  $p_1-p_2$ : diferencia de presión entre la entrada y la salida de agua; k: coeficiente de permeabilidad.

#### 4.3.4.3 Zona 3: *Flysch calcáreo*

Las muestras obtenidas en estos materiales presentaban una importante fracturación, por lo que los tramos de longitud suficiente para poder tallar las probetas son más escasos que en las dos formaciones anteriores. Por esta razón el número de probetas ensayadas ha sido menor.

##### a. Ensayos de identificación y propiedades índice

En la Tabla 4-23 se recogen los valores medios obtenidos de los ensayos de identificación realizados en estos materiales.

Tabla 4-23: Resumen de los resultados de los ensayos de identificación y propiedades índice en el flysch calcáreo (Zona 3)

Nº muestra	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$G_s$	n (%)	Abs. (%)	$\omega$ (%)	$s_r$ (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)
6961	-	25,45	2,68	3,2	1,1	-	-	58,4	-
6962	25,59	25,39	2,70	3,6	1,3	1,4	88,2	-	-

$\gamma$ : peso específico aparente con humedad natural;  $\gamma_d$ : peso específico seco;  $G_s$ : peso específico relativo de las partículas sólidas; n: porosidad; Abs.: absorción;  $\omega$ : humedad natural;  $s_r$ : grado de saturación; CaCO<sub>3</sub>: contenido en carbonato cálcico; SO<sub>3</sub>: contenido en sulfatos, expresado en SO<sub>3</sub>.

Aunque el grado de saturación obtenido con las muestras inalteradas sin desecar no es del 100 %, es de esperar que *in situ* sí lo sea ya que el terreno se encuentra bajo el nivel freático.

##### b. Ensayos de resistencia y deformabilidad

En esta formación se han tallado un total de 13 probetas para realizar ensayos de compresión, 6 de ellas en sentido longitudinal, otras 4 en sentido paralelo y 3 en sentido perpendicular (Tabla 4-24).

Tabla 4-24: Resultados de los ensayos de resistencia a compresión simple (RCS), de los ensayos de deformabilidad y de los ensayos de determinación de la velocidad de transmisión de las ondas de compresión ( $v_p$ ) y de corte ( $v_s$ ) en el flysch calcáreo (Zona 3).

Nº muestra	Tallado	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	RCS (MPa)	$E_1$ (MPa)	$E_3$ (MPa)	$\nu$	$v_p$ (m/s)	$v_s$ (m/s)
6961-I	Long.	-	25,4	-	101,7	20008	52442	0,53	5886	2407
6961-II	Long.	-	25,6	-	82,5	13899	70846	0,43	6215	2004
6961-X	Long.	25,60	-	-	38,7	12388	47138	0,14	5869	1937
6962-VI	Long.	25,49	-	0,6	33,7	17945	-	-	5945	1730
6962-VII	Long.	25,44	-	1,8	22,4	3097	-	-	5531	1609
6967-I**	Paral.	-	25,42	-	45,0	8000	-	-	6352	2658
6961-VII	Paral.	-	25,78	-	45,5	15846	46693	0,34	5856	1562
6962-III	Paral.	25,47	25,3	0,6	35,9	15040	20843	-	6544	1900
6962-IV	Paral.	25,36	24,9	1,3	41,8	5301	-	-	6326	2072
6962-V	Paral.	-	-	1,2	39,4	5685	-	-	6500	2080
6961-VIII	Perp.	25,26	-	-	62,6	12038	55798	0,48	5930	1954
6962-I	Perp.	25,68	25,5	0,7	68,0	11630	16000	-	5712	1747
6962-II	Perp.	25,72	25,4	1,2	27,2	4594	-	-	5919	1890

$\gamma$ : peso específico aparente con humedad natural;  $\gamma_d$ : peso específico seco;  $\omega$ : humedad natural; RCS: resistencia a compresión simple;  $\sigma_1$ : tensión vertical de rotura (MPa);  $\sigma_3$ : Presión de confinamiento (MPa);  $E_1$ : módulo de deformación medido en la parte lineal de la curva del pistón;  $E_3$ : módulo de deformación en la parte lineal de las curvas de las dos bandas extensométricas longitudinales;  $\nu$ : coeficiente de Poisson;  $v_p$ : velocidad de propagación de las ondas longitudinales;  $v_s$ : velocidad de propagación de las ondas transversales. (\*) Estratificación a 45°. Caras de la probeta en mal estado. (\*\*) Ensayada previamente en célula triaxial para determinar su permeabilidad.

Al igual que en las dos formaciones anteriores, también en este caso se observa una gran influencia de los resultados de resistencia y deformabilidad con la humedad de las muestras.

Utilizando los criterios descritos en el apartado 4.3.3 se ha cuantificado el grado de anisotropía de estos materiales. Según el método de Tsidzi (1997) el valor del VA es de 8,3 para las muestras con grado de saturación elevado y 6,3 para las muestras desecadas. Esto clasifica estos materiales como moderadamente anisótropos (Tabla 4-7). Según el criterio de Saroglou y Tsiambaos (2007) el índice  $I_{VP}$  es de 1,07 y 1,08 para las muestras con grado de saturación inferior y superior al 50 %, respectivamente, lo que clasifica al flysch calcáreo como débilmente anisótropo (Tabla 4-8).

Los principales resultados de los ensayos edométricos realizados con las muestras procedentes de la Zona 3 se resumen en la Tabla 4-25.

Tabla 4-25: Resultados de los ensayos edométricos realizados en el flysch calcáreo (Zona 3).

Muestra	Tallado	$\omega_{inicial}$ (%)	$\omega_{final}$ (%)	$\gamma_d$ inicial (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ final (kN/m <sup>3</sup> )	G	$h_0$ (mm)	$e_0$	$e_f$	$C_c$	$C_s$	$P_h$ (kPa)
6961-IX	Long.	7,0	8,9	25,4	21,7	2,68	19,7	0,057	0,055	0,0050	0,0013	No
6961-XI	Paral.	6,6	8,6	25,8	22,7	2,68	19,8	0,039	0,035	0,0053	0,0016	No
6961-XII	Perp.	6,3	7,6	25,3	22,3	2,68	17,9	0,059	0,058	0,0052	0,0017	No

$\omega_{inicial}$ : humedad inicial;  $\omega_{final}$ : humedad final;  $\gamma_d$  inicial: densidad seca inicial;  $\gamma_d$  final: densidad seca final; G: peso específico relativo de las partículas sólidas;  $h_0$ : altura inicial;  $e_0$ : índice de poros inicial;  $e_f$ : índice de poros final;  $C_c$ : índice de compresión;  $C_s$ : índice de entumecimiento;  $p_h$ : presión de hinchamiento.

Los módulos edométricos calculados resultan muy inferiores a los que podrían esperarse a partir de los ensayos de resistencia a compresión simple, lo que puede deberse a reblandecimiento de las caras de las pastillas, por penetración de agua en las fisuras formadas por retracción, etc. Esto hizo que se descartaran estos datos.

Los resultados de los ensayos de resistencia a tracción y a carga puntual realizados con las muestras procedentes de la Zona 3 se resumen en la Tabla 4-26.

Tabla 4-26: Resultados de los ensayos de resistencia a tracción (ensayo brasileño) y a carga puntual en el flysch calcáreo (Zona 3).

Nº muestra	Tallado	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	$\sigma_t$ (MPa)	$I_{550}$ (MPa)	Carga	Ensayo
6961-III	Long.	26,0	0,61	8,26	-	Paralela	Brasileño
6961-IV	Long.	23,8	0,84	9,03	-	Perpendicular	Brasileño
6961-C	Long.	-	-	-	4,43	Longitudinal	PLT Axial
6961-A	Paral.	-	-	-	-	Paralela	PLT Axial
6961-D	Paral.	-	-	-	3,32	Paralela	PLT Axial
6961-D'	Paral.	-	-	-	2,16	Paralela	PLT Axial
6961-E	Paral.	-	-	-	0,51	Paralela	PLT Axial
6961-G	Paral.	-	-	-	4,24	Paralela	PLT Axial
6961-XIII	Paral.	26,0	0,60	7,71	-	Perpendicular	Brasileño
6961-B	Perp.	-	-	-	5,54	Perpendicular	PLT Axial
6961-F	Perp.	-	-	-	6,02	Perpendicular	PLT Axial

$\gamma$ : peso específico aparente;  $\omega$ : humedad;  $\sigma_t$ : resistencia a tracción indirecta;  $I_{550}$ : índice de carga puntual normalizado para 50 mm.

Estos resultados presentan unas elevadas dispersiones. Para poder obtener alguna correlación de resultados sería preciso completarlos con un número de muestras muy superior al disponible.



### c. Otros ensayos

A la muestra 6967-I se le realizó un ensayo de permeabilidad en célula triaxial (Tabla 4-27). La permeabilidad obtenida indica que la roca matriz del flysch calcáreo es prácticamente impermeable.

Tabla 4-27: Resultados del ensayo de permeabilidad en la Zona 3 (flysch calcáreo).

Nº muestra	$\sigma'_3$ (MPa)	$p_1-p_2$ (MPa)	k (cm/s)
6967-I	1,47	2,55	$6,1 \cdot 10^{-11}$

$\sigma'_3$ : presión de confinamiento;  $p_1-p_2$ : diferencia de presión entre la entrada y la salida de agua; k: coeficiente de permeabilidad.

No se han realizado ensayos de durabilidad (o SEHUEDS) en este caso, al no tratarse de una roca arcillosa.

## 4.4 Características geotécnicas más destacables de las tres formaciones de la Unidad Algeciras

Las características geotécnicas más destacadas (Tabla 4-28) de cada unidad son:

Tabla 4-28: Valores medios de los principales parámetros obtenidos en esta campaña

Zona	RCS (MPa)	$E_i$ (MPa)	$v_p$ (m/s)	$v_s$ (m/s)	$E_p$ (MPa)	k (m/s)	$p_h$ (kPa)
FMAM	7	1750	3750	1250	3500	$3 \cdot 10^{-11}$	400
PR	6,9	1150	3150	1000	2000	$4,7 \cdot 10^{-12}$	118
FC	50	12500	5900	1800	1800	$6,1 \cdot 10^{-13}$	-

RCS: resistencia a compresión simple en dirección longitudinal;  $E_i$ : módulo de deformación medio;  $v_p$ : velocidad de propagación de las ondas p;  $v_s$ : velocidad de propagación de las ondas s;  $E_p$ : módulo presiométrico; k: permeabilidad en laboratorio;  $p_h$ : presión de hinchamiento máxima medida.

### - Zona 1: flysch margo-arenisco-micáceo

La resistencia de la roca matriz es baja (calificada como “blanda” de acuerdo con los criterios de clasificación de la ISRM), elevada deformabilidad y moderadamente anisótropa. Se puede estimar como módulo de deformación medio en cualquier dirección un valor en torno a 1750 MPa, así como en la dirección horizontal. El módulo relativo varía entre 100 (tallado perpendicular) y 200 (otras direcciones).

La velocidad de transmisión de ondas longitudinales en las probetas varía entre unos 3500 y 4000 m/s y la de las ondas de corte entre unos 1000 y 1500 m/s.

En la dirección longitudinal se estimaron los parámetros del criterio de rotura de Hoek y Brown:  $m_i = 3,3$  y  $RCS = 7,0$  MPa. Este valor de  $m_i$  se encuentra en el rango definido por Hoek para las rocas argilíticas ( $4 \pm 2$ ).

Estos materiales presentaron hinchamiento al agua, siendo los valores de presión de hinchamiento obtenidos de hasta 402,7 kPa.

La roca matriz es prácticamente impermeable y de durabilidad alta.

### **- Zona 2: pelitas rojas**

Se trata de una roca de baja resistencia (calificada como “blanda” de acuerdo con los criterios de la ISRM), elevada deformabilidad y débilmente anisótropa. El valor medio estimado del módulo de deformación es de 1150 MPa. El módulo relativo varía entre 200 para tallado paralelo en condiciones de saturación y 100-150 en otras direcciones. Las muestras desecadas muestran valores superiores.

La velocidad de transmisión de ondas longitudinales varía entre unos 2800 y 3500 m/s y la de las ondas de corte entre unos 800 y 1200 m/s.

Los parámetros del criterio de rotura de Hoek y Brown obtenidos fueron:  $m_i = 4,4$  y  $RCS = 6,9$  MPa. Este valor de  $m_i$  se encuentra en el rango definido por Hoek para las rocas argilíticas, igual a  $4 \pm 2$ .

La roca matriz presenta hinchamiento al agua, con presiones de hinchamiento medidas de hasta 118 kPa en muestras con tallado perpendicular.

La roca matriz es prácticamente impermeable y de durabilidad media.

### **- Zona 3: flysch calcáreo**

Según los valores obtenidos se trata de una roca de resistencia media-baja (calificada como “moderadamente dura” de acuerdo con la clasificación de la ISRM), deformabilidad media y débil a moderadamente anisótropa. El módulo relativo varía entre 300 y 500. Se podría estimar un módulo de deformación medio en cualquier dirección en torno a 12,5 GPa para la roca matriz.

La velocidad de transmisión de ondas longitudinales varía entre unos 5500 y 6300 m/s y la de las ondas de corte entre unos 1600 y 2000 m/s.

No presenta presión de hinchamiento.

La roca matriz es prácticamente impermeable, aunque la formación presenta importante permeabilidad por fracturación.

En este caso, los datos deben ser tomados con prudencia debido al escaso número de ensayos que se ha podido realizar en esta formación, por encontrarse la muestra muy fracturada.

### **- Comparación entre las tres formaciones:**

En las tres formaciones se ha observado una gran influencia de la humedad tanto en la resistencia como en la deformabilidad de las muestras (Figura 4-16 y Figura 4-17). La resistencia aumenta sistemáticamente y de forma notable para valores menores del grado de saturación. El desecado de las muestras puede aumentar su resistencia hasta en 3 veces. Los módulos de deformación varían del mismo modo con la humedad, pudiendo llegar a aumentar hasta 4 veces.

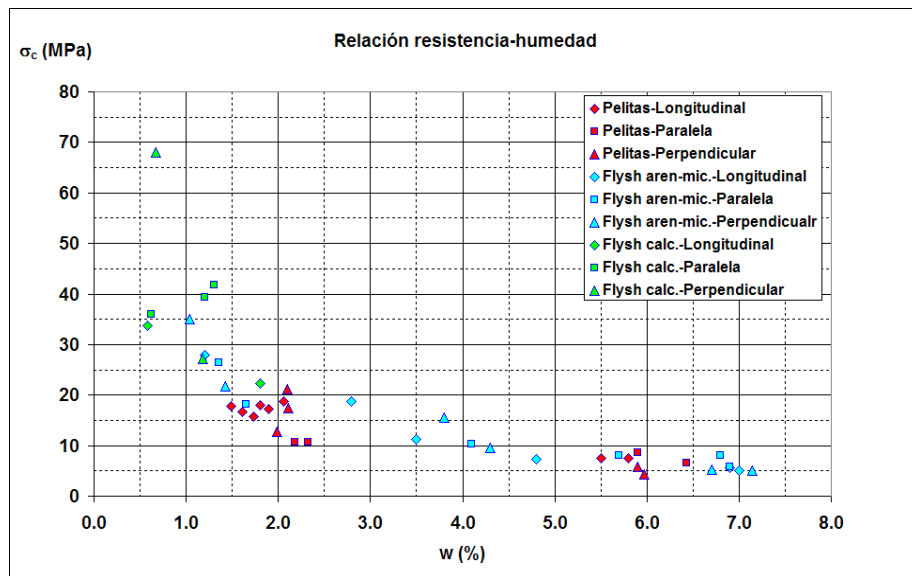


Figura 4-16. Relación de la resistencia a compresión simple ( $\sigma_c$ ) de las muestras ensayadas con la humedad ( $w$ ).

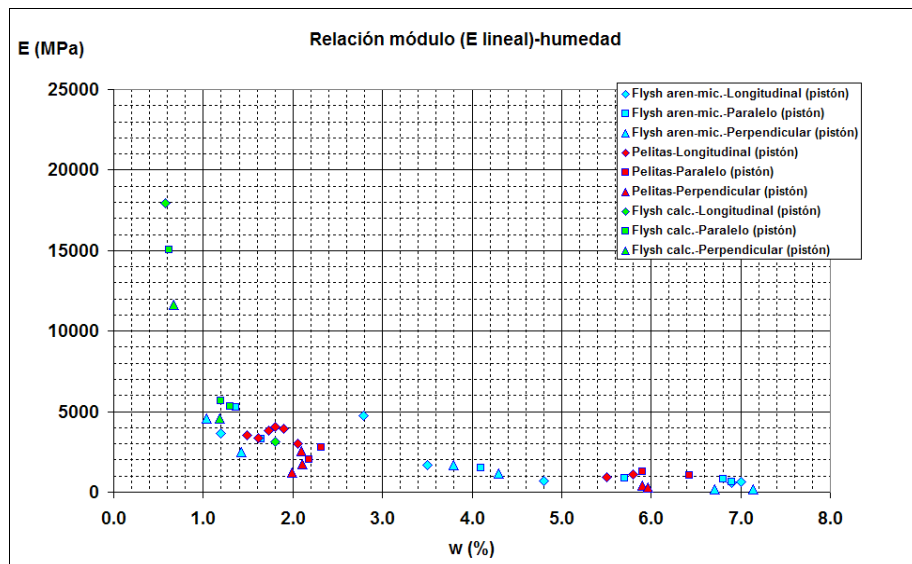


Figura 4-17. Relación entre el módulo de deformación lineal ( $E_{\text{lineal}}$ ) de las muestras ensayadas con la humedad ( $w$ ).

En las muestras desecadas pertenecientes al flysch margo-arenisco-micáceo o a las pelitas rojas se observó que las probetas con tallado perpendicular presentaban mayor resistencia a las talladas en otras direcciones. En las muestras con humedad natural no se observó este fenómeno. Tampoco mostraron este fenómeno las muestras pertenecientes al flysch calcáreo.

En el caso de la deformabilidad, esta resultó mayor en las muestras talladas en dirección perpendicular a la laminación. Esta anisotropía se mostró más acusada en las muestras desecadas.

Por otra parte, los valores de los módulos de deformación obtenidos en los ensayos presiométricos *in situ* son superiores tanto en el caso del flysch margo-arenisco-micáceo como en las pelitas rojas, en cuanto a valores medios. Se han obtenido valores *in situ* del orden de 1,5 veces superiores. No obstante, los mayores valores de los módulos de deformación obtenidos en laboratorio son del mismo orden de magnitud que los de campo. Es muy posible que la diferencia de valores se deba a la alteración y descompresión de las muestras.

En el caso del flysch calcáreo, se han obtenido unos módulos de deformación mucho mayores en laboratorio, de un orden de magnitud superior. Al tratarse de una zona muy fracturada, parece lógico que los valores obtenidos en laboratorio sean superiores a los deducidos en campo, ya que los ensayos de laboratorio se realizan sobre probetas talladas con las partes más sanas de los testigos recuperados. En esta zona, debido al elevado grado de fracturación de los testigos, se ha ensayado un número de muestras muy escaso (una en tallado perpendicular y dos en paralelo con humedad natural).

#### **4.5 Conclusiones de esta campaña:**

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo principal de esta campaña era la comparación de diferentes técnicas a fin de optimizar futuras campañas *offshore*. Sobre este tema se extrajeron las siguientes conclusiones:

Cualquiera de las técnicas empleadas puede arrojar, por sí sola, una información muy valiosa de las características resistentes y deformacionales del terreno objeto de estudio. No obstante, todas presentan ciertas limitaciones y dificultades de interpretación, por lo que lo más recomendable es utilizarlas de forma conjunta y complementaria, contrastando los resultados arrojados por cada una de ellas. En todos los casos es conveniente, siempre que sea posible, disponer de la información adicional suministrada por el testigo continuo recuperado, lo que permite complementar la información obtenida de cualquiera de los ensayos con la caracterización geomecánica de los materiales atravesados (CEDEX, 2012e).



## **CAPÍTULO 5**

## **CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA**



# 5.

## CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

---

Los datos recopilados en el capítulo 3 y los obtenidos en el capítulo 4 han sido analizados con el fin de realizar la caracterización de los diferentes materiales involucrados en el proyecto.

Estos datos, como se ha visto, han sido obtenidos a lo largo de más de 30 años y, por tanto, debido entre otros factores a la evolución de la técnica, no son tan uniformes como sería de desear. Por otro lado, la gran extensión geográfica de la zona de estudio conlleva una gran variabilidad de los materiales que dificulta en gran medida el análisis de datos y la obtención de conclusiones. Al final del capítulo (apartado 5.2.6) se ha analizado el grado de caracterización de cada parámetro en cada unidad y la certidumbre de los valores presentados, en función del número y variabilidad de datos, número de localizaciones, número de proyectos, calidad de la descripción de las muestras y metodología de ensayos y calidad del muestreo.

### 5.1 Metodología

Una de las principales dificultades a la que se enfrenta la geotecnia es la heterogeneidad de los materiales que conlleva una gran variabilidad en las propiedades de los mismos. A esto se le añade la complejidad de la toma de muestras que obliga, en la mayoría de las ocasiones, a trabajar con series de datos más pequeñas de lo deseable. Todo esto hace que la estimación de los parámetros geotécnicos representativos de un cierto material sea compleja y deba de hacerse con precaución.

En este caso, dado el gran volumen de datos a analizar, se ha decidido aplicar un enfoque estadístico a la caracterización de los materiales estudiados, utilizándose las recomendaciones indicadas por el Eurocódigo 7.

Una vez estudiados los datos geotécnicos con que se cuenta en el proyecto del túnel bajo el estrecho de Gibraltar, recopilados en los capítulos 3 y 4, se ha realizado el análisis estadístico de cada parámetro para cada unidad siguiendo el siguiente método:



1. Filtrado, corrección y procesado de los datos
2. Determinación de los parámetros estadísticos
3. Ajuste a una distribución estadística
4. Obtención de los valores característicos
5. Determinación de los rangos de confianza para la población
6. Estimación del número de datos necesarios para un error dado
7. Determinación del grado de caracterización de cada unidad

El estudio estadístico detallado de cada parámetro para cada unidad se recoge en el Apéndice III.

### **5.1.1 Filtrado, corrección y procesado de los datos**

Dada la variada procedencia de datos, así como el gran periodo de tiempo durante el cual se ha desarrollado el proyecto del túnel bajo el estrecho de Gibraltar, ha sido necesaria una labor de filtrado, corrección y análisis de los datos recopilados.

Esta función comenzó con el descarte de los datos no válidos en los que se detectara algún tipo de error (p.ej. valores del coeficiente de Poisson mayores de 0,5) o que no pudiera asegurarse su procedencia o asignación a una determinada unidad.

Tras el descarte de datos se realizó una homogenización de unidades de medida al sistema internacional. Tras esto se procedió al agrupado de los datos en función de su litología dejándolos ya preparados para su análisis estadístico. Los datos filtrados y procesados se recogen en el apéndice II.

### **5.1.2 Determinación de los parámetros estadísticos**

Una vez agrupados los datos se calcularon los parámetros estadísticos de las muestras con las que se contaba y, a partir de éstos, se estimaron aquellos representativos de la población a partir de las siguientes expresiones:

$$\mu = \bar{x} \quad (5-1)$$

$$\sigma = s \sqrt{\frac{n-1}{n}} \quad (5-2)$$

$$\nu = \frac{\sigma}{\mu} \quad (5-3)$$

siendo:

- n: número de datos de la muestra
- $\bar{x}$ : valor medio de la muestra
- $\mu$ : valor medio de la población
- $\sigma$ : desviación estándar de la población
- s: desviación estándar de la muestra

- $v$ : coeficiente de variación de la población

### 5.1.3 Ajuste a una distribución estadística

En primer lugar se agruparon los datos de cada parámetro (variable aleatoria) en 16 clases, obteniéndose así el histograma de distribución de la variable. La amplitud de las clases fue de  $0,5 \cdot \sigma$  a fin de obtener un rango suficiente para la representación de todos los datos. En ocasiones en las que la variable presentaba valores muy alejados de la media se modificó esta amplitud hasta  $1\sigma$  a fin de incluir todos los datos en el análisis.

Tras esto se determinó el tipo distribución estadística que mejor representaba cada conjunto de datos a analizar. Para el análisis se utilizaron las distribuciones poblacionales que suelen describir el comportamiento de materiales geotécnicos (distribución normal, log-normal, gamma y uniforme). La bondad del ajuste entre cada función de distribución y los datos reales de la muestra se determinó mediante la suma de diferencias cuadráticas (error de ajuste), eligiéndose aquella con la que menor error se cometiera en el ajuste:

$$Q_K = \sum_{i=1}^{i=k} [(F_i - P_i)^2] \quad (5-4)$$

siendo:

- $Q_k$ : error de ajuste
- $k$ : número de clases en que se ha dividido la muestra.
- $i$ : clase de la variable aleatoria.
- $F_i$ : probabilidad acumulada de la muestra en la clase  $i$ .
- $P_i$ : probabilidad acumulada de la función teórica en la clase  $i$ .

El valor  $Q_k$  pondera de la misma manera las diferencias en la parte central de la función de distribución y en las colas. Este método de ajuste medio es, por tanto, adecuado para estimar valores centrales como la media, la varianza o el coeficiente de variación.

Para la obtención de los parámetros  $\alpha$  (parámetro de forma) y  $\beta$  (parámetro de escala) que definen la distribución Gamma se utilizó la siguiente aproximación propuesta por Thom (1958):

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right] \quad (5-5)$$

$$A = \ln \bar{x} - \frac{\sum \ln x_i}{n} \quad (5-6)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (5-7)$$

siendo:

- $\alpha$ : parámetro de forma de la distribución Gamma
- $\beta$ : parámetro de escala de la distribución Gamma
- $\bar{x}$ : valor medio de la muestra
- $x_i$ : valores que adopta la variable

#### 5.1.4 Obtención de los valores característicos

Una vez conocidos los estadísticos de cada parámetro, así como la función de distribución estadística que mejor lo representan, se calcularon sus valores característicos.

Según el Eurocódigo 7 (AENOR, 2010) en su párrafo 2.4.5.2(11): *“Si se emplean métodos estadísticos [para la determinación de los parámetros geotécnicos], el valor característico se debería determinar de modo que la probabilidad obtenida del valor pésimo que conlleva que se produzca el estado límite considerado no sea mayor del 5 %. NOTA: Con este punto de vista, una estimación prudente del valor medio es una selección de los valores medios de un conjunto limitado de valores de los parámetros geotécnicos, con un nivel de confianza del 95 %; respecto al fallo local, una estimación prudente del valor inferior es el percentil del 5 %.”*

Según este apartado del EC-7 debería tenerse en cuenta como valor característico el percentil 5 (ó 95) para el estudio de fallo local o una estimación prudente del valor medio con una confianza del 90% para el caso de fallo global. En el caso de un tunel, y más en fases preliminares del proyecto, la estimación de los valores característicos encaminados al estudio del fallo global resulta suficientemente adecuada y por tanto será el criterio seguido en esta tesis. No obstante, también se incluyen los valores de los percentiles 5 y 95 de la distribución estadística en las tablas correspondientes a cada parámetro.

Para la obtención de estos valores se buscó el rango de confianza para la media con un nivel de confianza  $(1-\alpha)$  del 90 %. De este modo el valor medio de la población tendrá solamente un 5 % de probabilidad de encontrarse por debajo del límite inferior y un 5 % de probabilidad de encontrarse por encima del límite superior.

En cada caso y para cada parámetro se escoge como valor característico aquél de entre los dos que quede del lado de la seguridad. Esto es, el menor de ellos si se trata de un parámetro favorable y el más alto en caso de tratarse de un parámetro desfavorable. Por ejemplo, en caso de calcular la estabilidad de un talud los parámetros resistentes se consideran favorables y por tanto, a fin de permanecer del lado de la seguridad, se debería utilizar el valor característico inferior ( $X_{k,inf}$ ); en cambio, en el caso del peso específico, siendo un parámetro principalmente desfavorable, debería tomarse, a fin de quedar nuevamente del lado de la seguridad, el valor característico superior ( $X_{k,sup}$ ).

Para ello, a partir de los estadísticos de la población y su función de densidad  $f(x_i)$  se calcula, basándose en la teoría central del límite, la función de densidad de la media  $f(\bar{x})$ . A partir de esta función pueden obtenerse los rangos de confianza de la variable  $\mu$ . En la Figura 5-1 se representan esquemáticamente estos parámetros.

La función de densidad del valor medio de una población presenta los siguientes parámetros:

$$\mu_{\bar{x}} = \mu \quad (5-8)$$

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sigma^2}{n} \quad (5-9)$$

siendo:

- $\mu$ : valor medio de la población
- $\mu_{\bar{x}}$ : valor medio de la función de densidad de la media
- $\sigma^2$ : varianza de la población
- $\sigma_{\bar{x}}^2$ : varianza de la función de densidad de la media

- $n$ : número de datos de la muestra

Según la nomenclatura del Eurocódigo 0 (AENOR, 2003), el valor característico se encuentra desplazado de la media un cierto valor que dependerá de las características de la muestra estadística analizada. En el caso de una función normal toma las siguientes expresiones:

$$X_k = \mu \pm e \quad (5-10)$$

$$e = k_n \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = k_n \cdot \sigma_{\bar{x}} \quad (5-11)$$

siendo:

- $X_k$ : valor característico
- $\mu$ : valor medio de la población
- $e$ : error de estimación de la media para un nivel de confianza  $(1-\alpha)$
- $k_n$ : cuantil  $(1-\alpha/2)$  de la distribución Normal estándar  $N(0,1)$
- $\sigma$ : desviación estándar de la población
- $\sigma_{\bar{x}}$ : desviación estándar de la función de densidad de la media
- $n$ : número de datos de la muestra

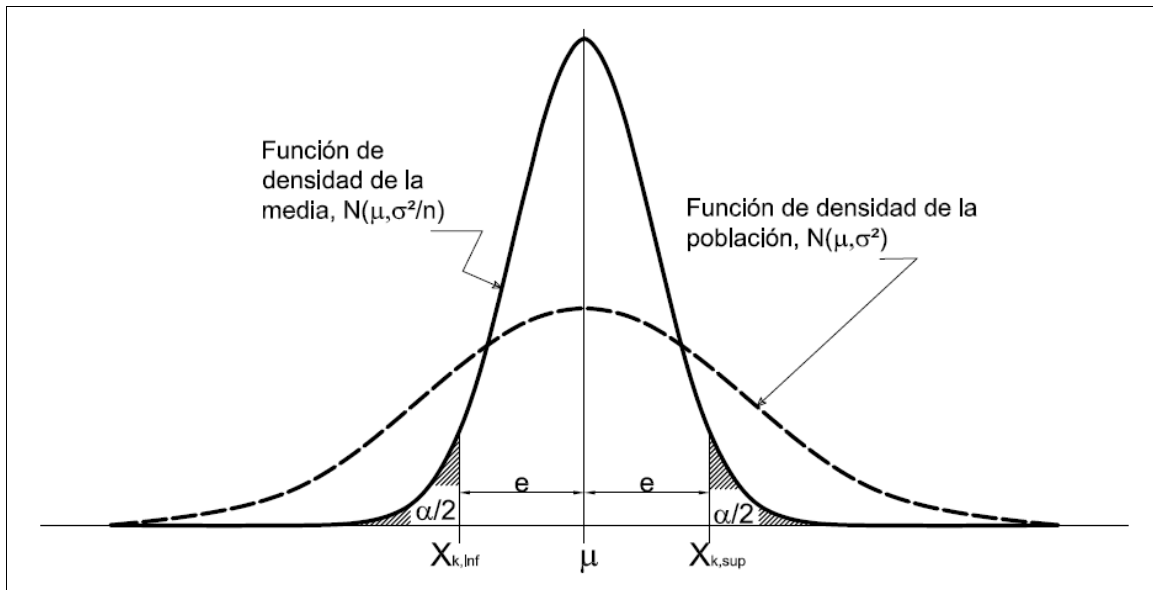


Figura 5-1. Estimación del rango de confianza para la media en una distribución normal

En caso de una distribución Log-normal debe tenerse en cuenta la realización de un cambio de variable, quedando las expresiones del siguiente modo:

$$X_k = \exp \left[ \mu_y \pm k_n \frac{\sigma_y}{\sqrt{n}} \right] \quad (5-12)$$

$$\mu_y = \frac{1}{n} \sum \ln(x_i) \quad (5-13)$$

siendo:

- $\mu_y$ : valor medio de los logaritmos de la muestra
- $k_n$ : cuantil  $(1-\alpha/2)$  de la distribución Normal estándar  $N(0,1)$
- $\sigma_y$ : desviación estándar de los logaritmos de la muestra
- $n$ : número de datos de la muestra

Cuando la variable estudiada no sigue una distribución normal o el número de datos de la muestra es pequeño ( $n < 30$ ), la utilización de la función normal puede restar fiabilidad al valor dado. Por tanto, en este caso es preferible la utilización de una distribución tipo t de Student, tomando las expresiones la siguiente forma:

$$X_k = \mu \pm e \quad (5-14)$$

$$e = t(n-1, 1-\alpha/2) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5-15)$$

siendo:

- $X_k$ : valor característico
- $\mu$ : valor medio de la población
- $e$ : error de estimación de la media para un nivel de confianza  $(1-\alpha/2)$
- $t(n-1, 1-\alpha/2)$ : el cuantil  $(1-\alpha/2)$  de la distribución t con  $n-1$  grados de libertad
- $\sigma$ : desviación estándar de la población
- $n$ : número de datos de la muestra

En caso de muestras muy pequeñas ( $n \leq 10$ ) la utilización de métodos puramente estadísticos, si bien pueden ser utilizados desde el punto de vista teórico, producirá valores del coeficiente de variación más altos que los que realmente presentaría el material (Schneider, 1999). Bond y Harris (2008) sugieren en estos casos, la determinación de  $X_k$  a partir de la siguiente expresión:

$$X_k = \mu \pm e \quad (5-16)$$

$$e = \frac{\sigma}{2} \quad (5-17)$$

siendo:

- $X_k$ : valor característico
- $\mu$ : valor medio de la población
- $e$ : error de estimación de la media para un nivel de confianza  $(1-\alpha/2)$
- $\sigma$ : desviación estándar de la población

Toda la metodología seguida para la obtención de los parámetros característicos se resume en la Figura 5-2- Los valores característicos calculados para cada una de las unidades litológicas se recogen, a modo de resumen, en el Apéndice IV.

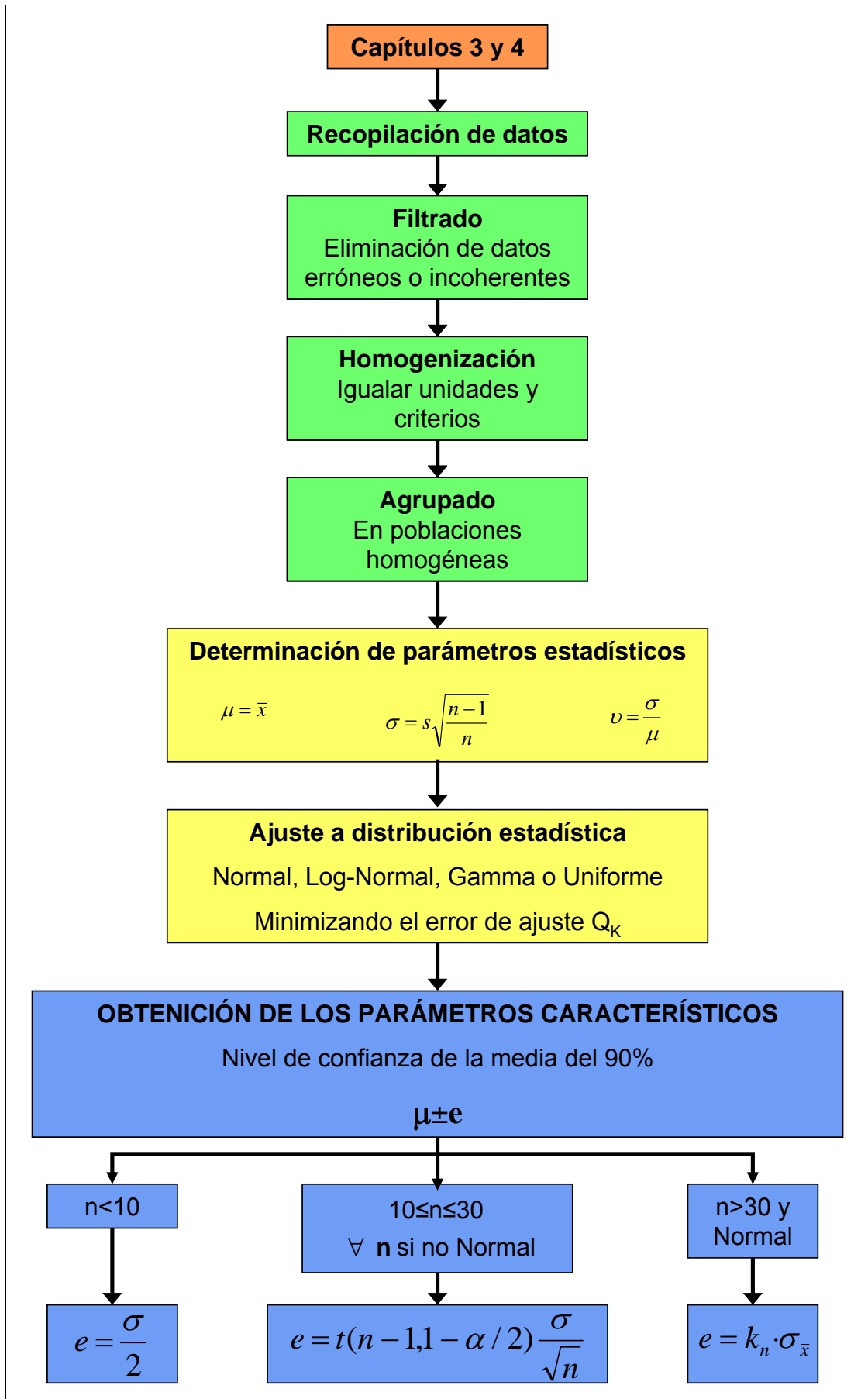


Figura 5-2. Metodología empleada para la determinación de los parámetros característicos

### 5.1.5 Determinación de los rangos de confianza para la población

A fin de servir como referencia, se ha calculado el rango de valores para cada uno de los parámetros de cada unidad, en los que se tenga una probabilidad del 90 % de encontrar un valor puntual de ese parámetro. Es decir, se espera que el 90 % de los datos medidos se encuentre dentro de ese rango.

Para la obtención de este rango se han calculado, para la función estadística que mejor representa cada parámetro, sus percentiles 5 y 95. De este modo, se determina el rango dentro del que, teóricamente, se encontrará el 90 % de la población. Estos valores se recogen en las tablas correspondientes a cada unidad.

### 5.1.6 Estimación del número de datos necesarios para un error dado

En una distribución estadística, el error de estimación de la media ( $e$ ) depende en gran medida del tamaño muestral como se ha visto en el apartado 5.1.4. Este error ( $e$ ) es directamente proporcional a la desviación típica e inversamente proporcional al número de datos de la muestra. El número de datos mínimo  $n_{\min}$  necesario para minimizar este error a un valor determinado, puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$n_{\min} = \left( \frac{k_n \cdot \sigma}{\mu \cdot e_{\mu}} \right)^2 \quad (5-18)$$

siendo

- $n_{\min}$ : número de datos mínimo
- $k_n$ : fractil de la distribución para un nivel de confianza de  $1-\alpha/2$
- $\mu$ : valor medio de la población
- $\sigma$ : desviación estándar de la población
- $e_{\mu}$ : error de estimación de la media en función de  $\mu$

Por tanto, si se busca un nivel de confianza del 95 % en los datos puede calcularse el número mínimo de datos ( $n_{\min}$ ) para minimizar el error a un valor determinado. El valor de  $m$  puede ser modificado mediante el uso de factores de seguridad ( $\gamma_m$ ) mayorándolo o minorándolo para quedar del lado de la seguridad. Si se tienen en cuenta el factor de seguridad que mayor el valor medio, el número de datos necesario para un error determinado disminuiría según la siguiente expresión:

$$n_{\min} = \left( \frac{k_n \cdot \sigma}{\mu \cdot \gamma_m \cdot e_{\mu}} \right)^2 \quad (5-19)$$

siendo

- $n_{\min}$ : número de datos mínimo
- $k_n$ : fractil de la distribución para un nivel de confianza de  $1-\alpha/2$
- $\mu$ : valor medio de la población
- $\sigma$ : desviación estándar de la población
- $e_{\mu}$ : error de estimación de la media en función de  $\mu$
- $\gamma_m$ : factor de seguridad parcial

Comparando el número de datos con el que se cuenta ( $n$ ) con los valores obtenidos utilizando la ecuación (5-19) para una confianza del 95 % y para los diferentes valores de  $\gamma_m$ , se puede obtener el error mínimo que puede obtenerse con cada parámetro. Esto se recoge en las diferentes tablas como “error mínimo”. En este caso se han calculado los valores de  $n_{\min}$  para errores del 0,05 $\mu$ , 0,1 $\mu$  y 0,25 $\mu$  y utilizando factores de seguridad ( $\gamma_m$ ) de 1,4; 1,2 y 1,0.

### **5.1.7 Determinación del grado de caracterización de cada unidad**

En este punto se pretendió determinar cuál es el nivel de conocimiento con que se cuenta de cada unidad con el fin encontrar posibles carencias y permitir una correcta planificación de futuros estudios.

Para la realización de este análisis se evaluó en primer lugar el grado de certidumbre de los valores representativos estimados para cada parámetro de manera independiente. Posteriormente, se evaluó el conjunto de los datos de cada unidad poniéndose de manifiesto los puntos más débiles de la caracterización y aquellos en los que los datos obtenidos todavía no son suficientemente fiables.

En los siguientes apartados se describe la metodología empleada.

#### ***5.1.7.1 Determinación de la certidumbre de cada parámetro***

Para este fin se desarrolló una nueva metodología. Se estimó, para cada parámetro, de manera cualitativa un grado de certidumbre que puede dársele en base a diferentes variables. Los aspectos que se escogieron para calificar la certidumbre fueron los siete siguientes:

- Número de datos
- Variabilidad o bondad de ajuste
- Número de proyectos
- Número de localizaciones
- Descripción de los ensayos
- Descripción de las muestras
- Toma de muestras

En función de los datos de cada parámetro analizado se asignó una “nota o calificación” para cada uno de los aspectos anteriores.

La suma de la nota parcial de cada una de las siete variables evaluadas permite una estimación cualitativa de un grado de certidumbre para un determinado parámetro (véase apartado 5.1.7.2). Este parámetro de certidumbre, permite evaluar las posibles carencias de caracterización que presenta el proyecto y planificar de una manera adecuada futuras campañas de reconocimiento.

En los apartados siguientes se describen los criterios utilizados para cada una de las variables evaluadas.

##### ***5.1.7.1.1 Número de datos***

En una zona de estudio tan amplia como esta, el número de datos es un punto muy importante a la hora de determinar la bondad de un estudio de caracterización. Este número de datos debe ser tal que permita un estudio representativo de toda la unidad geotécnica considerada.



Si el parámetro evaluado es muy poco variable, pocos datos pueden ser suficientes para una correcta determinación de los valores representativos, en cambio, si el parámetro tiene una gran variabilidad, el número de datos necesarios para su correcta caracterización aumenta.

A partir del cálculo del número de datos mínimo necesarios para obtener los parámetros característicos con un nivel de confianza del 95 % y con un error respecto a la media determinado (del modo que se ha descrito en el apartado 5.1.6), se ha evaluado el número de datos real con el que cuenta cada población.

Este parámetro se ha puntuado de la siguiente manera:

- El número de datos es suficiente para obtener un error de 0,05 $\mu$ : +2
- El número de datos es suficiente para un error de 0,10 $\mu$ : 1
- El número de datos es suficiente para un error de 0,25 $\mu$ : 0
- El número de datos no es suficiente para un error de 0,25 $\mu$ : -1
- El número de datos no permite un estudio estadístico correcto ( $n < 10$ ): -2

#### 5.1.7.1.2 Variabilidad o bondad de la correlación

Si el parámetro evaluado presenta una variabilidad muy grande su caracterización presenta mayor incertidumbre y, por tanto, una menor “certidumbre” del valor característico calculado.

En el caso de que el parámetro se evalúe a escala de macizo rocoso (ensayos *in situ*, permeabilidad, etc.), la variabilidad observada puede corresponderse a diferentes estados de fracturación del macizo. Si la correlación entre un parámetro y las características geomecánicas del macizo es buena incluso presentando una importante variabilidad su “certidumbre” será buena.

Como valores de referencia para comparar el coeficiente de variación se han elegido, de los diferentes valores publicados en la literatura específica, los que se recogen en el texto de las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias (Tabla 5-2), ROM 0.5-05 (Puertos del Estado, 2006).

Tabla 5-1. Coeficiente de variación recomendado por la ROM 0.5-05 (Puertos del Estado, 2006) para algunos parámetros geotécnicos.

Parámetro	Coeficiente de variación, $v$
Pesos específicos	0,05
Humedades	0,10
Ángulo de rozamiento (tangente)	0,07
Cohesión	0,10
Resistencia al corte sin drenaje	0,15
Resistencia a compresión simple (suelos)	0,15
Resistencia a compresión simple (rocas)	0,20
Presión límite (ensayos presiométricos)	0,15
Módulo de elasticidad	0,30
Coeficiente de Poisson	0,05
Índice de compresión y entumecimiento	0,10
Coeficiente de consolidación	0,50

Este parámetro se ha puntuado de la siguiente manera:

En caso de parámetros de la roca matriz:

- El coeficiente de variación es menor al recogido en la literatura: +2
- El coeficiente de variación es cercano al recogido en la literatura: 0
- El coeficiente de variación es claramente superior al recogido en la literatura: -2

En caso de parámetros del macizo rocoso:

- Presenta una clara correlación con la calidad del macizo y semejante a las publicadas en la literatura: +2
- Presenta una correlación con la calidad del macizo no semejante a las publicadas en la literatura: +0
- No presenta ningún tipo de correlación con los parámetros de calidad del macizo: -2

#### 5.1.7.1.3 Número de proyectos

En este punto se ha tenido en cuenta el número de estudios diferentes que han aportado información a la caracterización de un parámetro. Si dos estudios realizados por diferentes grupos y con diferente metodología alcanzan una misma conclusión, el peso de este dato será mucho mayor que si un solo estudio lo respalda.

Este parámetro se ha puntuado de la siguiente manera:

- Más de dos proyectos realizados por al menos dos laboratorios diferentes: +1
- Dos proyectos: 0
- Un solo proyecto: -1

#### 5.1.7.1.4 Número de localizaciones

Dada la amplia extensión espacial del proyecto, es fundamental la toma de muestras en diferentes localizaciones a fin de estudiar la variabilidad de los parámetros. La certidumbre de un parámetro será mayor cuanto mayor sea el número de localizaciones estudiadas.

Este parámetro se ha puntuado de la siguiente manera:

- Más de dos localizaciones distintas y diferentes profundidades: +2
- Dos localizaciones y diferentes profundidades: 0
- Una sola localización: -2

#### 5.1.7.1.5 Descripción de los ensayos

En este punto se tiene en cuenta la calidad de los ensayos realizados o al menos la descripción de la metodología empleada. Cuanto mejor sea esta descripción mayor información se podrá obtener de los ensayos y mejor explicación podrá darse a los valores obtenidos.

Este parámetro se ha puntuado de la siguiente manera:

- Metodología de ensayo bien descrita, según una norma adecuada: +1
- Metodología de ensayo no suficientemente descrita: 0
- Metodología de ensayo no descrita o con importante falta de datos: -1

#### 5.1.7.1.6 Descripción de las muestras

Este apartado tiene en cuenta el grado de descripción de las muestras empleadas en una determinada campaña de ensayos.

Una mayor descripción de la muestra permite una mayor confianza en un determinado valor así como analizar la causa de datos discordantes, variabilidades o datos anómalos.

Este parámetro se ha puntuado de la siguiente manera:

- Muestras bien descritas litológica y estructuralmente y con una procedencia y metodología de extracción bien recogida: +1
- Muestras con una descripción incompleta: 0
- Muestras sin descripción o con una descripción muy pobre: -1

#### 5.1.7.1.7 Toma de muestras

Este parámetro tiene en cuenta el posible sesgo en los datos debido a la metodología utilizada para la toma de muestras.

Si esta toma de muestras se hace siguiendo otros criterios (ej. solamente se recogen muestras buenas, solamente se recogen testigos mayores de cierta longitud, la muestra es cribada antes de ensayar, solamente se cuenta con datos someros, etc.) pueden introducirse importantes sesgos en la población que hagan sobrevalorar o minusvalorar un parámetro.

Si la toma de muestras es sistemática y planificada adecuadamente no se incluirá ningún sesgo y por tanto la muestra será más representativa de la población completa.

Este parámetro se ha puntuado de la siguiente manera:

- Muestreo sistemático adecuadamente planificado: +1
- Muestreo no planificado o no hay datos: 0
- Muestreo claramente sesgado: -1

#### 5.1.7.2 Grado de caracterización de cada unidad

Una vez evaluados todos los parámetros de manera individual (Tabla 5-2), los resultados fueron agrupados por unidades. De esta manera se puede determinar cuál es el grado de caracterización de cada una de ellas facilitando así el diseño de futuras campañas de reconocimiento que deberán estar orientadas a la subsanación de las carencias encontradas en este estudio.

Tabla 5-2. Ponderación de cada una de las variables utilizadas para la determinación de la certidumbre.

Parámetro	Rango	Valoración	Observaciones	
Número de datos $n = \left( \frac{z^* \cdot \sigma}{ME} \right)$	ME ≤ 5% X	+2	Se calcula el número mínimo de datos para obtener un error determinado en la estimación de la media	
	5 % X < ME ≤ 10 % X	+1		
	10 % X < ME ≤ 25 % X	0		
	Error ≥ 25% X	-1		
	n < 10	-2		
Variabilidad o bondad del ajuste	Roca matriz	υ < ROM 0.5-05	+2	Se compara la u con las publicadas para este mismo parámetro
		υ ≈ ROM 0.5-05	0	
		υ > ROM 0.5-05	-2	
	Macizo rocoso	Buena correlación	+2	Se evalúa la correlación de este parámetro con otros como la fracturación.
		Correlación no buena Ninguna correlación	0 -2	
Número de proyectos	>2		+1	Se evalúa el número de trabajos diferentes en los que se ha medido el parámetro.
	2		0	
	1		-1	
Número de localizaciones	>2		+2	Se evalúa el número de localizaciones en las que se ha medido el parámetro.
	2 y diferentes profundidades		0	
	1		-2	
Descripción de las muestras	Bien descritas		+1	Tiene en cuenta el grado de descripción de las muestras
	No suficientemente descritas		0	
	No existe descripción		-1	
Descripción de los ensayos	Bien descritas		+1	Tiene en cuenta el grado de descripción del ensayo realizado
	No suficientemente descritas		0	
	No existe descripción		-1	
Toma de muestras	Muestreo sistemático planificado		+1	Evalúa la bondad del tipo de toma de muestras
	Muestreo no planificado o sin datos		0	
	Muestreo claramente sesgado		-1	

En base a estos criterios se han definido 6 clases de certidumbre para cada parámetro (Tabla 5-3): Muy buena, buena, media, mala, muy mala y sin datos.

Tabla 5-3. Grado de certidumbre

Nota	Certidumbre	Color
>+5	Muy buena	VERDE CLARO
+3 a +5	Buena	VERDE OSCURO
-2 a +2	Media	AMARILLO
-5 a +3	Mala	NARANJA
<-5	Muy mala	ROJO
Sin datos	-	NEGRO

Un parámetro con certidumbre **Muy buena** puede ser tomado como definitivo y no requerirá nuevas campañas de caracterización (si bien, un mayor número de datos siempre será positivo); un parámetro con clase de certidumbre **Buena** requerirá algún ensayo adicional (preferiblemente incidiendo en los parámetros menos puntuados); la clase **Media** identifica parámetros poco fiables y que requieren una intensa campaña adicional para ser determinados; los parámetros con una certidumbre **Mala** o **Muy Mala** deben ser tomados solamente como aproximación y no deberían introducirse (sin realizar ensayos adicionales) en un modelo de cálculo.

## 5.2 Caracterización geotécnica de las diferentes unidades

A continuación (Tabla 5-4) se recogen los resultados del análisis estadístico de los diferentes parámetros evaluados en cada unidad. Estos resultados se han analizado con un punto de vista geológico-geotécnico a fin de obtener la mejor comprensión posible de las propiedades y el comportamiento geotécnico de estos materiales.

Tabla 5-4. Resumen de parámetros evaluados en cada unidad

Unidad	Parámetros de laboratorio																			Parámetros in situ											
	$\gamma$	$\gamma_d$	$\gamma_s$	$\gamma_{sat}$	#	IP	RCS	RTI	Is <sub>50</sub>	E <sub>i</sub>	v	v <sub>p</sub>	v <sub>s</sub>	E <sub>dyn</sub>	c	$\phi$	H <sub>lin.</sub>	P <sub>Hinch</sub>	C <sub>v</sub>	C <sub>s</sub>	k	Id <sub>2</sub>	$\rho$	E <sub>p</sub>	E <sub>g</sub>	E <sub>PC</sub>	c	$\phi$	k		
Algeciras	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X				X	X	X	X				X*	
	X						X	X	X	X	X	X	X	X	X								X	X	X						
	X						X	X	X	X	X	X	X	X	X								X	X	X						
Almarchal	X	X	X		X	X	X		X	X					X	X	X	X	X				X	X	X	X	X	X	X	X	X
Bolonia		X				X	X	X	X									X	X				X								X
	X					X	X	X	X	X								X	X												X
	X								X																						X
Facinas	X					X			X						X	X	X	X	X	X	X		X								
Rellenos de paleoanal	X	X	X	X	X	X	X		X	X					X	X															
	X	X	X	X	X	X	X			X					X	X															

(\*) evaluado en el conjunto de la unidad;  $\gamma$ : peso específico aparente;  $\gamma_d$ : peso específico seco;  $\gamma_s$ : peso específico de las partículas sólidas;  $\gamma_{sat}$ : peso específico saturado; #: granulometría; IP: Plasticidad; RCS: resistencia a compresión simple; RTI: resistencia a tracción indirecta; Is<sub>50</sub>: índice de carga puntual; Ei: módulo de deformación; v: coeficiente de Poisson; v<sub>p</sub>: velocidad de propagación de ondas p; v<sub>s</sub>: velocidad de propagación de ondas s; Edyn: módulo de deformación dinámico; c cohesión;  $\phi$ : ángulo de rozamiento interno; H<sub>in</sub>: hinchamiento libre; P<sub>Hinch</sub>: presión de hinchamiento; C<sub>v</sub>: coeficiente de compresibilidad; C<sub>s</sub>: coeficiente de entumecimiento; k: permeabilidad; I<sub>D2</sub>: índice de desmoronamiento;  $\rho$ : densidad in situ; Ep: módulo presiométrico; Eg: módulo de deformación con grippers; E<sub>PC</sub> módulo de deformación medido con placa de carga.

### 5.2.1 Unidad de Algeciras (Beni Ider)

Como se ha comentado en capítulos anteriores esta unidad está dividida en varios tramos litológicos, de los cuales se han ensayado tres: Flysch margo arenoso micáceo, Pelitas rojas y Flysch calcáreo. Estos tramos están compuestos por diferentes intercalaciones y sucesiones de argilitas, margas, limolitas, areniscas, calizas y calcarenitas. Para una mejor interpretación de los ensayos, estos se han agrupado en tres grupos litológicos:

- Arcillosos: Agrupando argilitas y margas
- Detríticos: Agrupando areniscas y limolitas
- Calcáreos: Agrupando calizas y calcarenitas

En los siguientes apartados se analizan los ensayos geotécnicos realizados en estos materiales, determinándose, en la medida de lo posible, para cada uno de ellos sus valores característicos.

#### 5.2.1.1 Propiedades elementales

En estos materiales se han realizado numerosos ensayos de determinación del peso específico aparente (Tabla 5-5 y Figura 5-3):

Tabla 5-5. Peso específico de la Unidad de Algeciras por litologías

Parámetro	$\gamma_{ap}$ (kN/m <sup>3</sup> )			
	Global	Arcillosos	Detríticos	Calcáreos
n	229	136	45	48
Máximo	28,5	26,6	26,6	28,5
Mínimo	16,0	16,0	23,4	22,1
$\mu$	24,0	23,1	25,0	25,6
$\sigma$	2,39	2,58	0,99	1,09
$\nu$	0,10	0,11	0,04	0,04
Distribución	NORMAL	NORMAL	NORMAL	NORMAL
$X_{k,inf}$	23,8	22,8	24,7	25,3
$X_{k,sup}$	24,3	23,5	25,2	25,8
Percentil 05	20,1	18,9	23,3	23,8
Percentil 95	28,0	27,4	26,6	27,4
Error mínimo	-	5 %	5 %	5 %

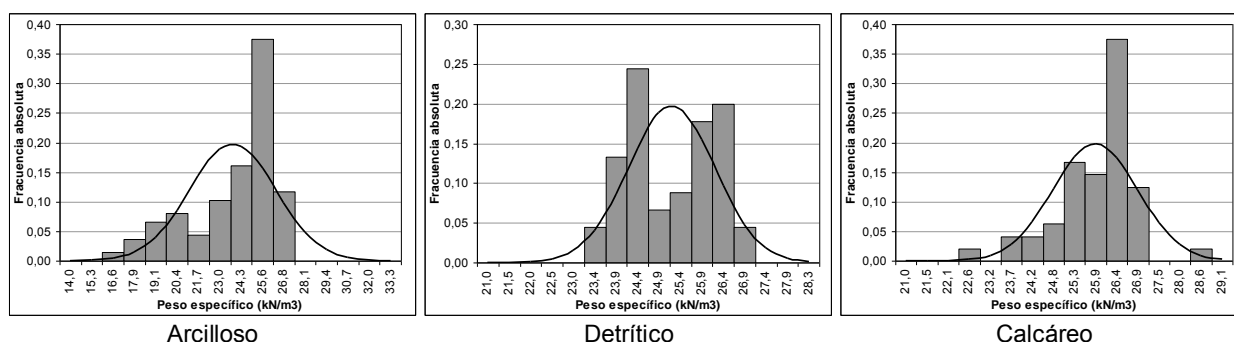


Figura 5-3. Peso específico de los materiales de la Unidad de Algeciras.

El peso específico de los materiales ( $23,1 \text{ kN/m}^3$  en los materiales arcillosos,  $25,0$  en los detríticos y  $25,6 \text{ kN/m}^3$  en los calcáreos) se encuentra dentro de los márgenes habituales para este tipo de materiales y presenta una variabilidad escasa.

En la Tabla 5-6 y Figura 5-4 se recogen los valores representativos de las determinaciones de la densidad *in situ* realizadas mediante el método de la arena en materiales arcillosos.

Tabla 5-6. Densidad aparente *in situ* de los materiales arcillosos de la Unidad de Algeciras

Parámetro	Densidad <i>in situ</i> ( $\text{kg/m}^3$ )
Litología	Arcillosos
n	48
Máximo	2620
Mínimo	1820
$\mu$	2171
$\sigma$	155
$\nu$	0,07
Distribución	NORMAL
$X_{k,\text{inf}}$	2134
$X_{k,\text{sup}}$	2207
Percentil 05	1920
Percentil 95	2421
Error mínimo	5 %

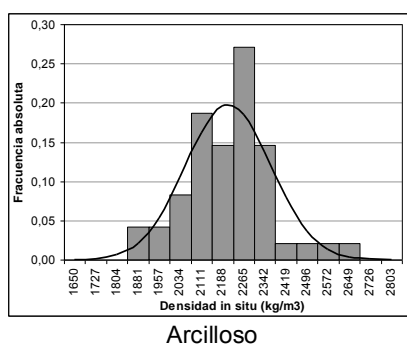


Figura 5-4. Densidad *in situ* de los materiales arcillosos de la Unidad de Algeciras.

Los datos analizados varían entre  $1820$  y  $2620 \text{ kg/m}^3$  con un valor medio de  $2171 \pm 255 \text{ kg/m}^3$ . El valor medio es algo más bajo que el correspondiente a la roca matriz ( $\gamma = 23,1 \pm 0,35 \text{ kN/m}^3$ ). Esto puede deberse a la fracturación propia del macizo así como a una posible descompresión de los materiales durante el proceso de excavación del pozo de Malabata.

La humedad natural de las muestras no puede analizarse en profundidad ya que en los estudios recopilados solo se indica el valor correspondiente a la humedad del material en el momento de ensayo pero no se indica si se ha conservado la humedad natural o no.

#### 5.2.1.2 Granulometría y Plasticidad

En los materiales arcillosos de esta unidad se han realizado 28 determinaciones de los límites de Atterberg (Tabla 5-7, Figura 5-5 y Figura 5-6).

Tabla 5-7. Índice de plasticidad de los materiales arcillosos de la Unidad de Algeciras.

Parámetro	Índice de plasticidad, IP
Litología	Arcillosos
n	28
Máximo	86
Mínimo	19
$\mu$	39,2
$\sigma$	19,0
$\upsilon$	0,49
Distribución	LOG.NORMAL
$X_{k,inf}$	34
$X_{k,sup}$	45
Percentil 05	16,8
Percentil 95	74,4
Error mínimo	25 %

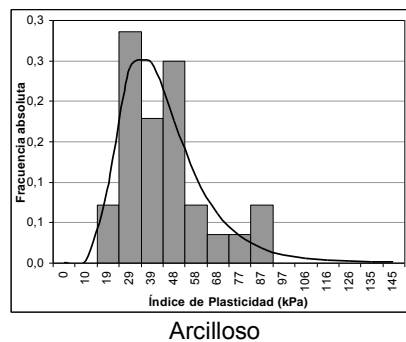


Figura 5-5. Índice de plasticidad de los materiales de la Unidad de Algeciras.

En la Figura 5-6 se muestran los 28 datos sobre los límites de Atterberg de los materiales arcillosos de la Unidad. La disposición de los datos en el gráfico es muy similar al resto de unidades estudiadas. Estas muestras se clasifican, en base a su plasticidad, como CL-CH.

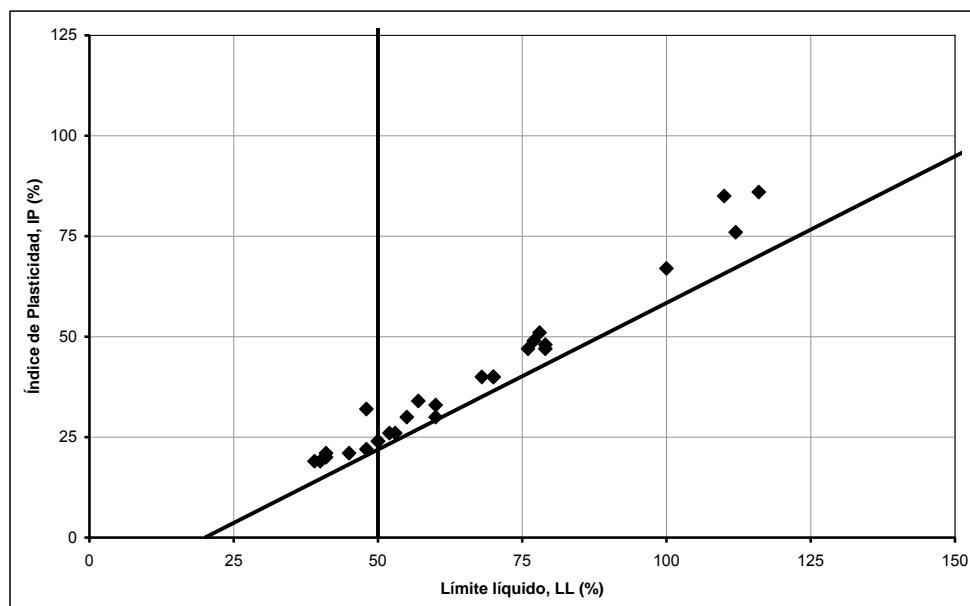


Figura 5-6. Gráfico de plasticidad de los materiales arcillosos de la Unidad de Algeciras



### 5.2.1.3 Resistencia y Deformabilidad

A lo largo de las diferentes campañas han sido varios los métodos utilizados para evaluar la resistencia y deformabilidad de estos materiales, tanto en laboratorio como mediante ensayos *in situ*.

#### 5.2.1.3.1 Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio sobre la roca matriz que se han recopilado incluyen resistencia a compresión simple, carga puntual, tracción indirecta, corte directo, compresión triaxial y medida de velocidades de ondas p y s.

##### 5.2.1.3.1.1 Ensayos de resistencia a compresión simple y carga puntual

En este estudio se recogen datos de 98 ensayos de compresión simple (Tabla 5-8).

Tabla 5-8. Resistencia a compresión simple de los materiales de la Unidad de Algeciras.

Parámetro	Resistencia a compresión simple, RCS (MPa)			
Litología	Global	Arcillosos	Detríticos	Calcáreos
n	98	56	20	22
Máximo	101,70	67,80	58,60	101,70
Mínimo	0,15	0,15	6,80	9,09
$\mu$	23,80	12,53	30,43	46,44
$\sigma$	21,26	11,94	11,94	25,36
$\nu$	0,90	0,96	0,40	0,56
$X_{k,inf}$	20,23	9,86	25,81	37,14
$X_{k,sup}$	27,37	15,20	35,05	55,74
Percentil 05	3,11	1,61	9,79	11,89
Percentil 95	60,61	32,03	51,07	99,42
Error mínimo	10 %	25 %	25 %	25 %

Los datos muestran una importante variabilidad de los datos que, como puede verse en la Figura 5-7 muestran, en el caso de los materiales arcillosos y calcáreos, un sesgo positivo.

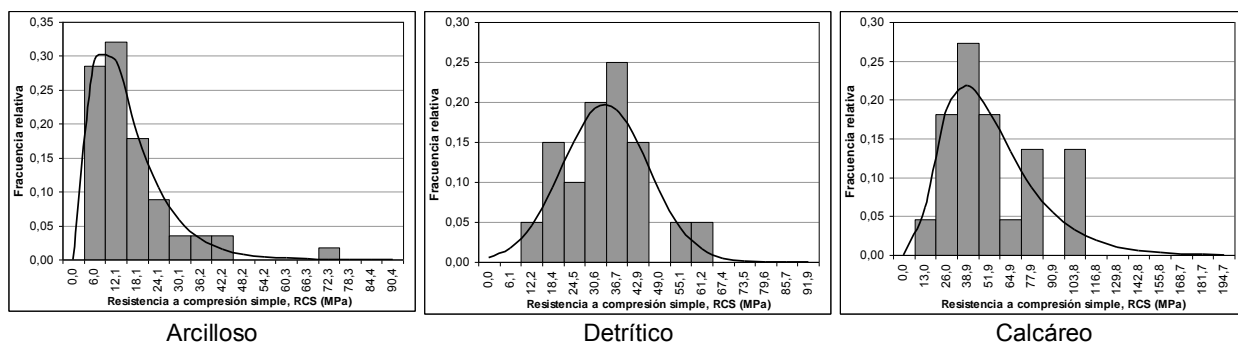


Figura 5-7. Resistencia a compresión simple de los materiales de la Unidad de Algeciras.

Los valores representativos están en torno a 13 MPa para los materiales arcillosos, 30 MPa para los detríticos y 46 MPa para los calcáreos, si bien pueden esperarse valores más bajos. De manera global la formación se encuentra formada por rocas blandas a moderadamente duras, aunque pueden encontrarse prácticamente todo el rango de valores entre suelos duros y rocas duras.

La variabilidad de los datos se debe a numerosos factores como la heterogeneidad de la roca matriz, diferentes estados de alteración, diferentes metodologías de ensayos, etc. Uno de estos factores puede ser la presencia de fracturas y fisuras en las muestras (Serrano, 2001). Otro es, sin duda, la humedad de las muestras en el momento del ensayo. En la Figura 5-8 se han representado los resultados de los ensayos de compresión simple en función de la humedad que presentaba la muestra en el momento del ensayo. Como puede observarse, la tendencia es similar para todas las litologías, con un claro aumento de la resistencia para humedades bajas.

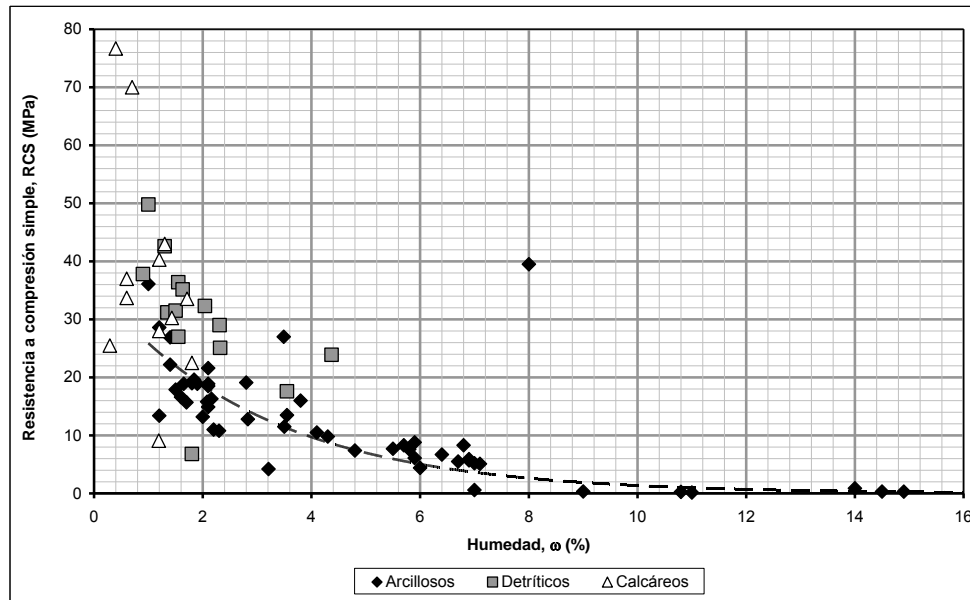


Figura 5-8. Influencia de la humedad de las muestras en la RCS en los materiales de la Unidad de Algeciras.

La correlación presentada en el gráfico de  $RCS = 35,9 \cdot \exp(-0,33 \omega)$  solamente tiene en cuenta los datos de los materiales arcillosos.

La clara influencia de la humedad en la resistencia a compresión simple hace que estos materiales deban ensayarse en condiciones de humedad natural siempre que sea posible. Esto dificulta en gran medida el pegado de bandas extensométricas.

En varios de los ensayos de resistencia a compresión simple se han medido las deformaciones producidas por la carga a fin de obtener los parámetros deformacionales de la roca matriz (Tabla 5-9).

Tabla 5-9. Módulo de Young de la matriz rocosa de los materiales de la Unidad de Algeciras.

Parámetro	Módulo de Young, $E_i$ (MPa)			
	Global	Arcillosos	Detríticos	Calcáreos
Litología				
n	78	44	17	17
Máximo	70846	13798	23612	70846
Mínimo	58	200	224	58
$\mu$	8334,8	4394,3	8939,2	17929,2
$\sigma$	13056,4	3101,3	6065,9	24245,9
$\nu$	1,58	0,71	0,70	1,39
Distribución	LOG.NORMAL	NORMAL	GAMMA	LOG.NORMAL
$X_{k,inf}$	6395	3625	6371	6809
$X_{k,sup}$	10864	5163	11508	47209
Percentil 05	352	0	1494	82
Percentil 95	37942	9496	21527	150862
Error mínimo	-	25 %	> 25 %	> 25 %

La variabilidad del módulo de deformación de la roca matriz es sumamente alta con características similares a las de la resistencia a compresión simple.

Los materiales más rígidos, en base a estos datos, son los calcáreos con valores representativos de entre 7 y 47 GPa mientras que los valores para los materiales arcillosos son de entre 4 y 5 GPa y entre 6 y 12 GPa para los detriticos. Cabe destacar la grandísima variabilidad que muestran los materiales calcáreos ( $\nu=1,48$ ).

Las diferentes metodologías de ensayo, que no siempre están bien descritas en los informes, pueden influir en gran medida en estos datos. Parámetros como la humedad de la muestra, las velocidades de carga o el sistema de medida de las deformaciones puede, como se menciona para estos materiales en Perucho *et al.* (2014), tener una gran influencia en los resultados.

Como puede observarse en los histogramas de distribución de la Figura 5-9, todas las curvas muestran un sesgo positivo. Es de destacar la distribución observada en los datos de los materiales calcáreos donde aparecen dos grupos diferentes de datos, uno con valores de módulo de unos 10 GPa y otro grupo con valores de entre 50 y 70 GPa.

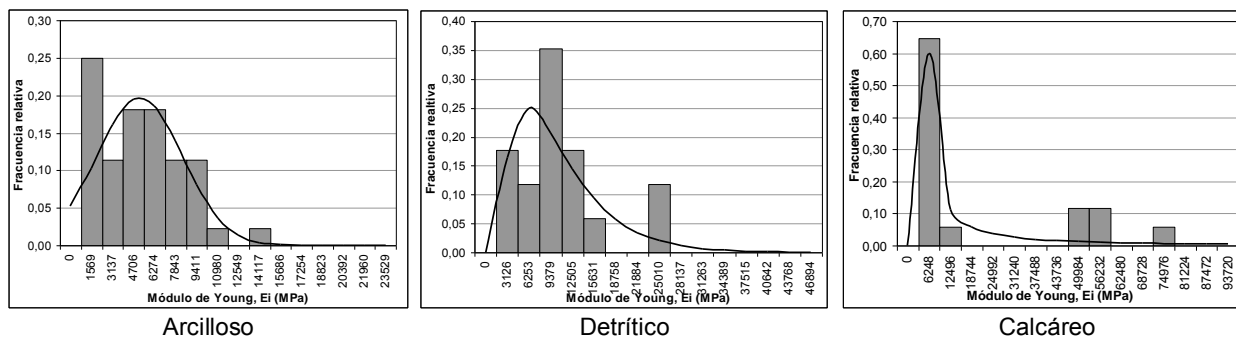


Figura 5-9. Módulo de Young de los materiales de la Unidad de Algeciras.

En la Figura 5-10 se han representado los valores de resistencia a compresión simple frente a los valores del módulo de deformación medidos en un mismo ensayo. De esta manera puede observarse el módulo relativo ( $E_i/RCS$ ) de cada litología.

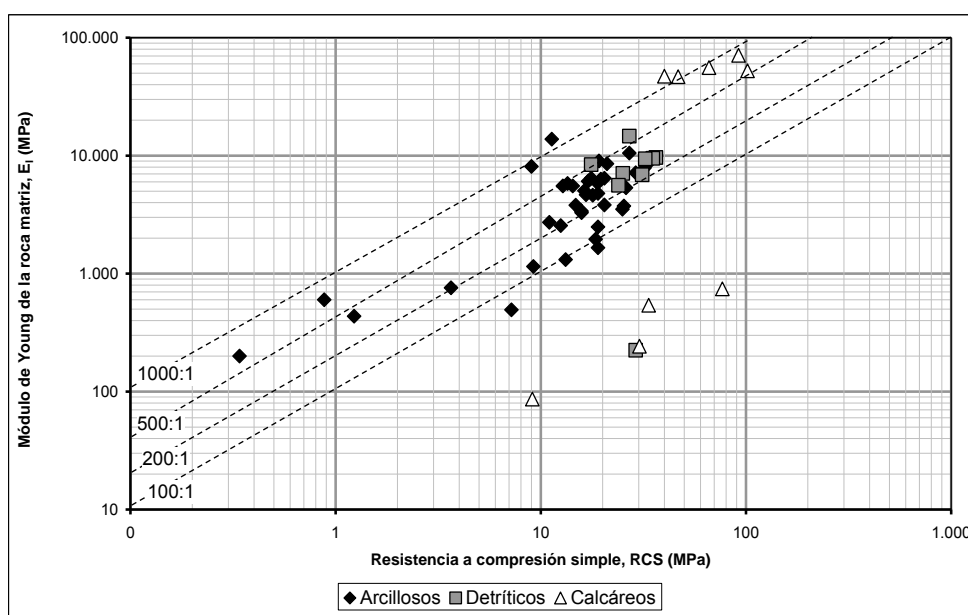


Figura 5-10. Módulo relativo de los diferentes materiales de la Unidad de Algeciras

Los módulos relativos para rocas sedimentarias arcillosas varían habitualmente entre 50 y 250; entre 200 y 700 las calizas y entre 100 y 300 las areniscas (Deere y Miller, 1966). En los materiales estudiados se puede ver como el módulo relativo de los materiales arcillosos varía entre 100 y 1000, el de los materiales detríticos se encuentra entre 200 y 500. En las calizas varía entre 500 y 1000. En estos dos últimos materiales se pueden observar valores sumamente bajos (en torno a 10) del módulo relativo que pueden ser debidos entre otros factores a una incorrecta medida de las deformaciones sufridas por la probeta.

De manera semejante a como se ha visto en la resistencia a compresión simple, la humedad influye en el módulo de deformación medido en las probetas. En la Figura 5-11 se han representado los valores de  $E_i$  en función de la humedad que presentaban las muestras en el momento del ensayo.

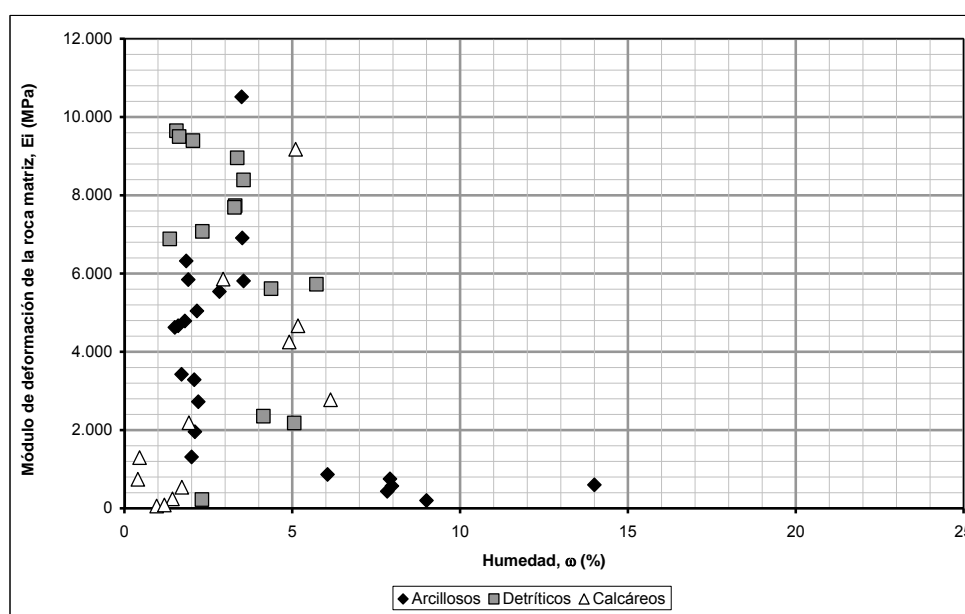


Figura 5-11. Influencia de la humedad de las muestras en el  $E_i$  en los materiales de la U. de Algeciras

La tendencia de los valores es similar a la observada en la RCS si bien es mucho menos clara, sobre todo en los materiales calcáreos. Esto indica que los factores que influyen en la deformabilidad de la matriz rocosa y en su correcta determinación son más numerosos que para otros parámetros. Por tanto, a fin de eliminar el mayor error posible parece importante la realización de los ensayos en condiciones de humedad natural siempre que sea posible.

En parte de los ensayos de deformación se determinó el coeficiente de Poisson. (Tabla 5-10 y Figura 5-12).

Tabla 5-10. Coeficiente de Poisson de los materiales de la Unidad de Algeciras.

Parámetro	Coeficiente de Poisson, $\nu$			
	Todos	Arcillosos	Detríticos	Calcáreos
n	65	34	17	14
Máximo	0,50	0,50	0,49	0,50
Mínimo	0,05	0,10	0,05	0,13
$\mu$	0,26	0,28	0,24	0,29
$\sigma$	0,10	0,11	0,11	0,12
$\nu$	0,39	0,40	0,45	0,41
Distribución	LOG.NORMAL	LOG.NORMAL	NORMAL	LOG.NORMAL
$X_{k,inf}$	0,24	0,25	0,19	0,23

<b>Parámetro</b>	<b>Coefficiente de Poisson, <math>\nu</math></b>			
<b>Litología</b>	<b>Todos</b>	<b>Arcillosos</b>	<b>Detríticos</b>	<b>Calcáreos</b>
$X_{k,sup}$	0,29	0,32	0,29	0,36
Percentil 05	0,11	0,12	0,06	0,13
Percentil 95	0,50	0,52	0,43	0,55
Error mínimo	-	10 %	25 %	25 %

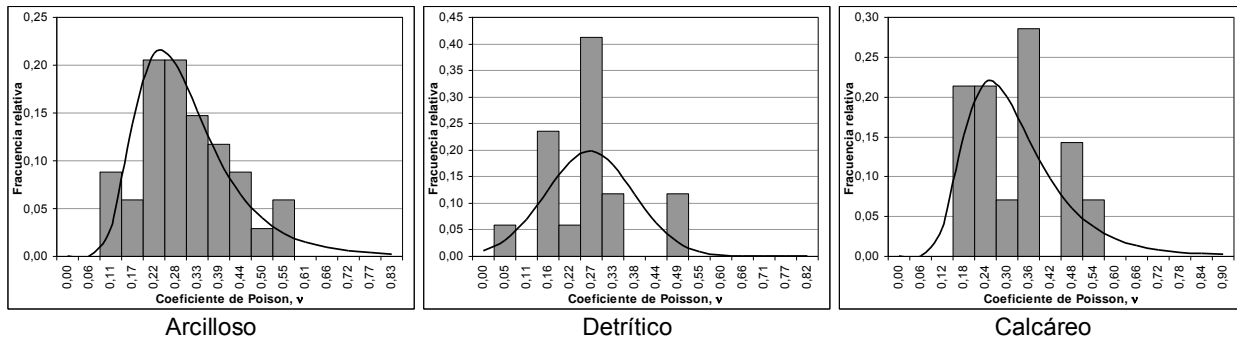


Figura 5-12. Coeficiente de Poisson de los materiales de la Unidad de Algeciras

Teniendo en cuenta que los valores del módulo de deformación en las rocas no varía más allá del rango  $0 < \nu < 0,5$ ; en todas las litologías ensayadas se han obtenido valores a lo largo de todo el rango posible teniendo, por tanto, poca validez los datos obtenidos. No obstante, los valores medios son los esperables para estos materiales.

#### 5.2.1.3.1.2 Ensayos de resistencia a la carga puntual

En la Tabla 5-11 se recogen los valores representativos de los ensayos de carga puntual realizados a materiales de la Unidad de Algeciras y recopilados en este trabajo. En este análisis se han eliminado el 20 % de los datos mínimos y máximos.

Tabla 5-11. Resistencia a carga puntual de los materiales de la Unidad de Algeciras.

<b>Parámetro</b>	<b>Índice de carga puntual, <math>I_{s50}</math> (MPa)</b>			
<b>Litología</b>	<b>Global</b>	<b>Arcillosos</b>	<b>Detríticos</b>	<b>Calcáreos</b>
n	69	40	23	6
Máximo	4,43	2,90	5,16	5,54
Mínimo	0,72	0,48	0,95	2,23
$\mu$	2,15	1,57	2,97	3,72
$\sigma$	1,02	0,63	1,31	1,14
$\nu$	0,48	0,41	0,45	0,33
Distribución	LOG.NORMAL	NORMAL	NORMAL	-
$X_{k,inf}$	1,95	1,41	2,50	2,79
$X_{k,sup}$	2,37	1,73	3,44	4,65
Percentil 05	0,84	0,53	0,73	-
Percentil 95	4,36	2,60	5,21	-
Error mínimo	-	10 %	25 %	-

Los valores del índice de carga puntual muestran tendencias semejantes a los de resistencia a compresión simple (Figura 5-13).

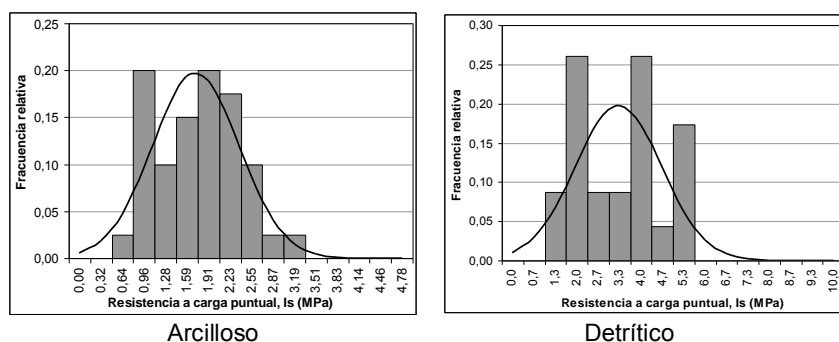


Figura 5-13. Resistencia a la carga puntual de los materiales de la Unidad de Algeciras.

Los materiales que muestran una mayor resistencia a la carga puntual son los calcáreos con valores medios de 3,7 MPa mientras que los arcillosos son los más débiles con una valor medio de 1,6 MPa. El valor de los materiales detríticos es de 3 MPa. La relación entre los valores medios de RCS y el  $Is_{50}$  es aproximadamente  $RCS \approx 10 \cdot Is_{50}$ .

#### 5.2.1.3.1.3 Ensayos de resistencia a tracción indirecta

La resistencia a tracción se ha medido por medio de ensayos de tracción indirecta, también llamados ensayos brasileños (Tabla 5-12 y Figura 5-14).

Tabla 5-12. Resistencia a tracción indirecta de los materiales de la Unidad de Algeciras

Parámetro	Resistencia a tracción indirecta, RTI (MPa)			
Litología	Global	Arcillosos	Detríticos	Calcáreos
n	77	33	25	19
Máximo	12,90	12,90	6,70	10,00
Mínimo	0,80	0,80	1,00	1,20
$\mu$	3,41	2,59	3,15	5,16
$\sigma$	2,57	2,35	1,91	2,86
$\nu$	0,76	0,92	0,62	0,57
Distribución	LOG.NORMAL	LOG.NORMAL	GAMMA	NORMAL
$X_{k,inf}$	2,98	2,16	2,50	4,02
$X_{k,sup}$	3,91	3,11	3,80	6,30
Percentil 05	0,80	0,71	0,67	0,20
Percentil 95	8,64	5,84	7,13	10,12
Error mínimo	-	25 %	25 %	25 %

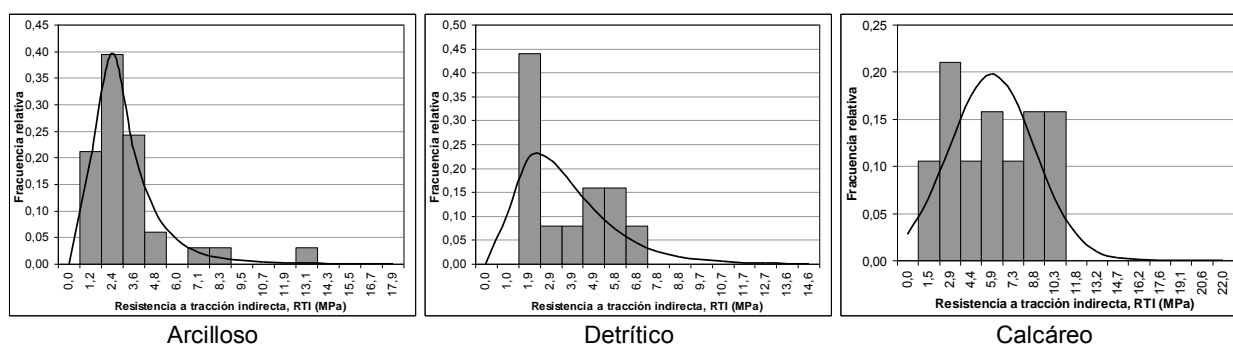


Figura 5-14. Resistencia a tracción indirecta de los materiales de la Unidad de Algeciras

Los valores medios de los ensayos de RTI y los ensayos de RCS muestran una relación aproximada de  $RTI \approx RCS/10$ . Esta relación es la que habitualmente se toma como referencia en

la estimación de la resistencia a tracción de la roca. Como puede observarse en el gráfico de la Figura 5-15, que representa valores de RCS y RTI obtenidos en ensayos realizados sobre muestras iguales, esta relación para materiales arcillosos se ha calculado como  $RTI \approx RCS/6,7$ . Para el resto de los materiales de esta unidad no hay suficientes datos como para realizar este análisis.

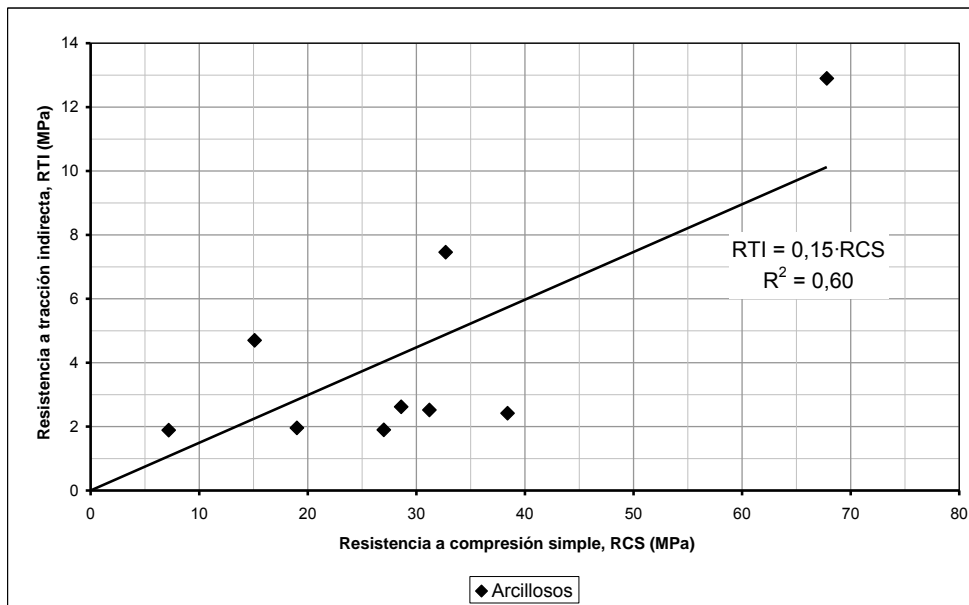


Figura 5-15. Relación entre la RTI y la RCS en materiales arcillosos de la unidad de Algeciras.

Al igual que se vio en la Figura 5-8 con la RCS, la resistencia a tracción también está fuertemente influenciada por la humedad de la muestra. En la Figura 5-16 se han representado del mismo modo los valores de RTI en función de la humedad de cada muestra. La influencia de la humedad en la RTI es la misma que la observada en la RCS con una fuerte influencia en las humedades más bajas (entre el 0 y el 5 %).

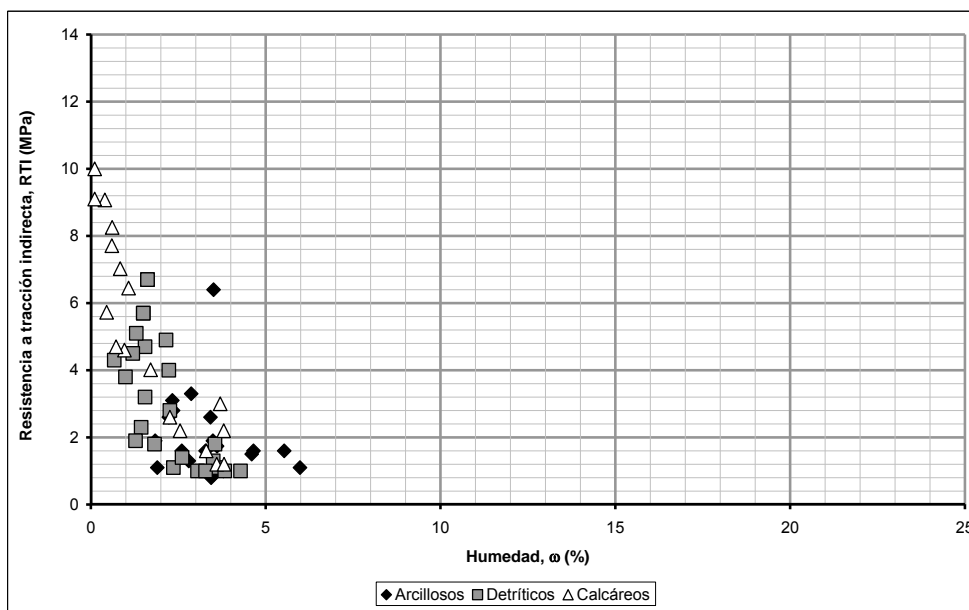


Figura 5-16. Influencia de la humedad de las muestras en la RTI en los materiales de la Unidad de Algeciras.

#### 5.2.1.3.1.4 Ensayos triaxiales y de corte directo

Con el fin de aumentar el número de datos y así aumentar la representatividad de los mismos, se han agrupado los datos de cohesión y de ángulo de rozamiento interno medidos en ensayos triaxiales y ensayos de corte directo. En la Tabla 5-13 se muestran los valores obtenidos con muestras de los materiales arcillosos de esta unidad. En los otros materiales no se han recopilado datos.

Tabla 5-13. Cohesión y ángulo de rozamiento interno de las litologías arcillosas de la Unidad de Algeciras.

Parámetro	Cohesión (kPa)	Ángulo de rozamiento (°)
Litología	Arcillosos	Arcillosos
n	18	18
Máximo	300,0	30,0
Mínimo	0,0	16,0
$\mu$	51,94	22,89
$\sigma$	69,06	4,12
$\nu$	1,37	0,19
Distribución	GAMMA	NORMAL
$X_{k,inf}$	23,6	21,20
$X_{k,sup}$	80,3	24,58
Percentil 05	3,5	15,7
Percentil 95	149,4	30,1
Error mínimo	> 25 %	10 %

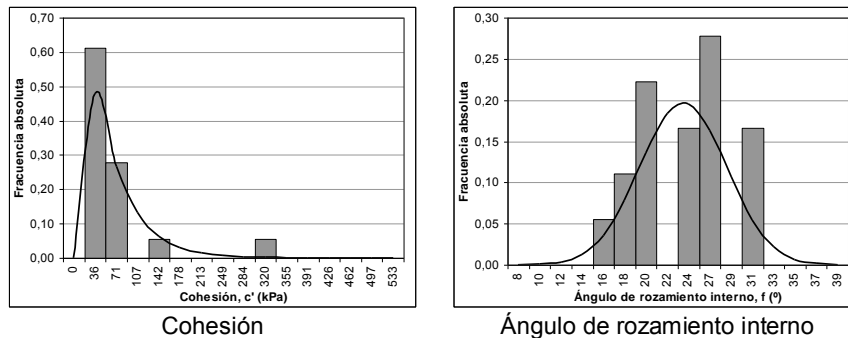


Figura 5-17. Cohesión y ángulo de rozamiento interno de las litologías arcillosas de la Unidad de Algeciras

Como puede verse tanto en la Tabla 5-13 como en los gráficos de la Figura 5-17, la variabilidad de los datos es muy alta. La cohesión varía entre 0 y 300 kPa y el ángulo de rozamiento interno entre 16 y 30°. Esta variabilidad hace que no pueda sacarse ninguna conclusión sobre la resistencia al corte de estos materiales.

Con el conjunto de datos de ensayos de compresión simple y de ensayos triaxiales recopilados, se han calculado las envolventes de rotura de Hoek y Brown y de Mohr-Coulomb con los siguientes resultados recogidos en la Figura 5-18:



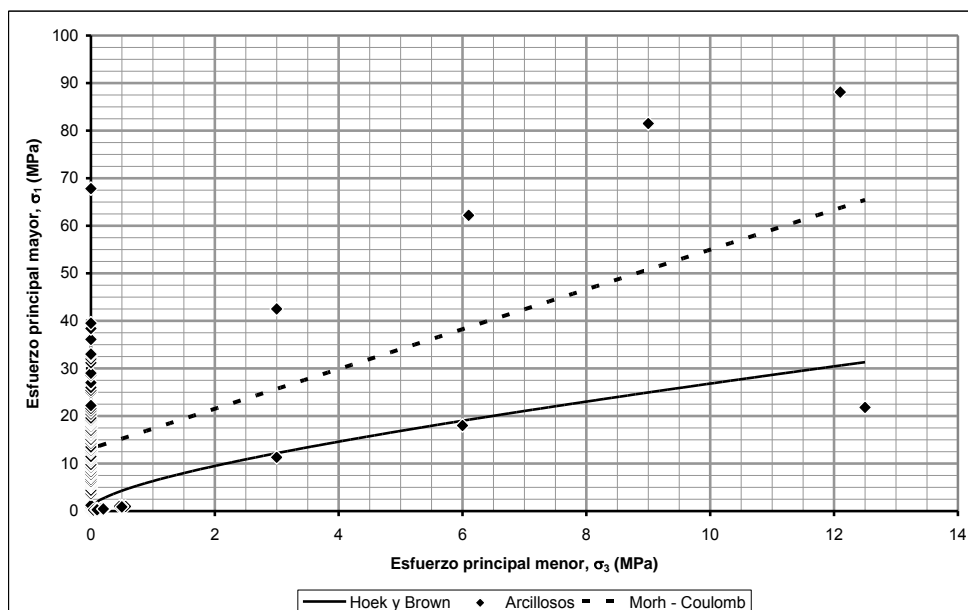


Figura 5-18. Envolventes de rotura de los materiales arcillosos de la Unidad de Algeciras

Criterio de rotura de Hoek y Brown:

$$m_i = 12,7$$

$$RCS = 13,4 \text{ MPa}$$

Criterio de rotura de Mohr-Coulomb:

$$c' = 3,2 \text{ MPa}$$

$$\phi' = 38^\circ$$

En el gráfico de la Figura 5-18 se aprecia una importante dispersión de los datos con grandes diferencias, principalmente en los datos de  $\sigma_3 = 0$ . Esta heterogeneidad impide un buen ajuste de los datos, si bien, el ajuste obtenido para una envolvente de Hoek y Brown aporta un valor conservador de la resistencia del macizo rocoso que puede tenerse como referencia, quedando del lado de la seguridad. El valor de RCS obtenido en este ajuste (13,4 MPa) concuerda perfectamente con el valor característico inferior de la RCS calculado para los materiales arcillosos (véase Tabla 5-8). El valor de  $m_i$  obtenido (12,7) es algo más alto que el recogido en la literatura (Hoek, 2007) para argilitas ( $4 \pm 2$ ) y para margas ( $7 \pm 2$ ).

Los valores de  $c'$  y  $\phi'$  calculados aquí son muy superiores a los que se aportan por separado en los diferentes ensayos triaxiales recopilados, siendo los aquí calculados más cercanos a lo que se podría esperar de un material rocoso blando.

#### 5.2.1.3.1.5 Medida de velocidad de propagación de ondas

La velocidad de propagación de ondas se ha medido en varias de las probetas, previamente a otros ensayos destructivos. En el trabajo de recopilación (véanse capítulos 3 y 4) se han recogido 87 registros. En la Tabla 5-14 y la Figura 5-19 se recogen los datos correspondientes a la velocidad de propagación de las ondas longitudinales (ondas P) mientras que en la Tabla 5-15 y la Figura 5-20 se recogen los correspondientes a la velocidad de propagación de las ondas transversales (ondas S).

Tabla 5-14. Velocidad de propagación de las ondas “p” de los materiales de la Unidad de Algeciras.

Parámetro	Velocidad de propagación de las ondas “p”, V <sub>P</sub> (m/s)			
Litología	Global	Arcillosos	Detríticos	Calcáreos
n	87	65	5	17
Máximo	7222	7222	3530	6544
Mínimo	1700	1700	2600	2143
μ	3821,4	3554,3	3026,4	5076,4
σ	1225,8	936,7	378,9	1502,7
ν	0,32	0,27	0,1	0,31
Distribución	LOG.NORMAL	LOG.NORMAL	-	NORMAL
X <sub>k,inf</sub>	3617	3370	2665	4440
X <sub>k,sup</sub>	4038	3748	3388	5713
Percentil 05	2178	2240	-	2453
Percentil 95	6082	5279	-	7700
Error mínimo		5 %	-	25 %

Tabla 5-15. Velocidad de propagación de las ondas “s” de los materiales de la Unidad de Algeciras.

Parámetro	Velocidad de propagación de las ondas “s”, V <sub>s</sub> (m/s)			
Litología	Global	Arcillosos	Detríticos	Calcáreos
n	87	65	5	17
Máximo	3127	3127	2100	2407
Mínimo	657	657	1565	1500
μ	1495,7	1354,4	1941,0	1904,7
σ	496,1	477,7	204,5	270,0
ν	0,33	0,36	0,12	0,15
Distribución	LOG.NORMAL	LOG.NORMAL	-	LOG.NORMAL
X <sub>k,inf</sub>	1412	1270	1746	1791
X <sub>k,sup</sub>	1585	1445	2136	2026
Percentil 05	826	764	-	1485
Percentil 95	2434	2161	-	2395
Error mínimo	-	10 %	-	10 %

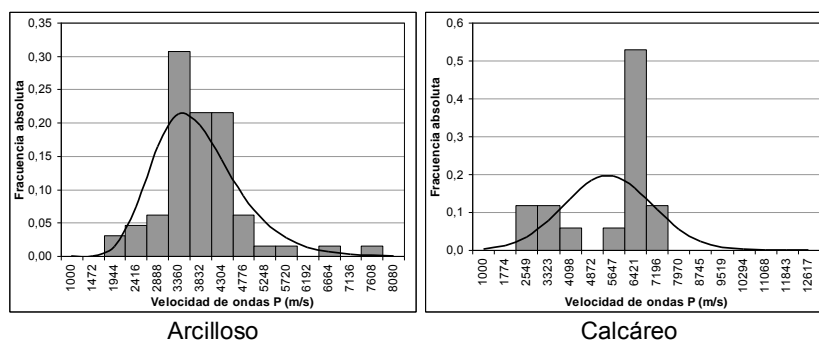


Figura 5-19. Velocidad de propagación de las ondas “p” de los materiales de la Unidad de Algeciras.

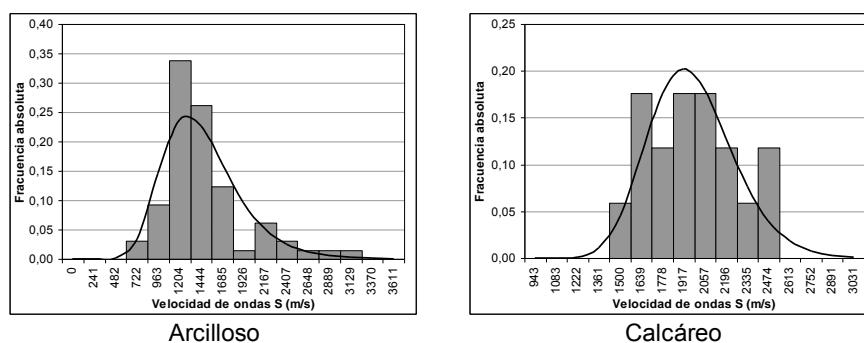


Figura 5-20. Velocidad de propagación de las ondas “s” de los materiales de la Unidad de Algeciras.

Los rangos de velocidades medidas son muy amplios indicando una fuerte heterogeneidad en el estado de las diferentes muestras. También se observa diferente distribución de los valores para las ondas s y p.

Con los datos anteriores de velocidad de propagación de ondas y de densidad, se ha calculado, para cada muestra, el valor del módulo de deformación para pequeñas deformaciones o módulo dinámico ( $E_{dyn}$ ). El análisis de los módulos obtenidos se muestra en la Tabla 5-16 y la Figura 5-21.

Tabla 5-16. Módulo elástico dinámico de la matriz rocosa de los materiales de la Unidad de Algeciras.

Parámetro	Módulo elástico dinámico, $E_{dyn}$ (MPa)			
Litología	Global	Arcillosos	Detríticos	Calcáreos
n	87	65	5	17
Máximo	39307	39307	17636	35230
Mínimo	2903	2903	7515	5454
$\mu$	12893,6	10963,2	12170,6	20487,4
$\sigma$	8076,2	7061,8	3775,7	8177,3
$\nu$	0,63	0,65	0,35	0,41
Distribución	LOG.NORMAL	LOG.NORMAL	-	NORMAL
$X_{k,inf}$	11615	9814	8571	17025
$X_{k,sup}$	14313	12247	15770	23950
Percentil 05	4086	3843	-	6211
Percentil 95	28654	22915	-	34764
Error mínimo	-	25 %	-	25 %

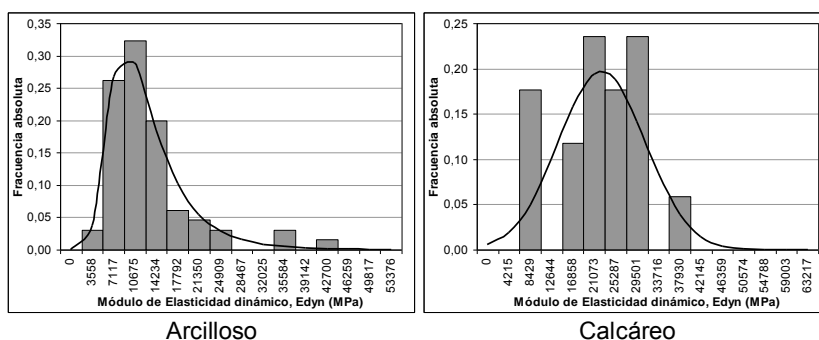


Figura 5-21. Módulo elástico dinámico de la matriz rocosa de los materiales de la Unidad de Algeciras.

Las tres litologías estudiadas muestran una importante variabilidad en cuanto al módulo de deformación dinámico se refiere, siendo los materiales arcillosos los que muestran una mayor variabilidad. Esto puede deberse a la importante fisuración a pequeña escala observada en estos materiales. De manera general pueden darse como valores representativos del  $E_{dyn}$  de unos 10 GPa para las litologías arcillosas, 10 GPa para las detríticas y 17 GPa para las calcáreas.

Existe, para los materiales arcillosos, una relación lineal entre el módulo dinámico y el módulo estático medidos en probetas (Figura 5-22). Esta relación no es clara en el caso de los materiales calcáreos si bien, esto puede deberse al escaso número de datos con los que se cuenta. También se puede observar que para el caso de los materiales arcillosos (donde hay suficientes datos) el  $E_{dyn}$  es aproximadamente el doble del  $E_i$  medido en la misma muestra.

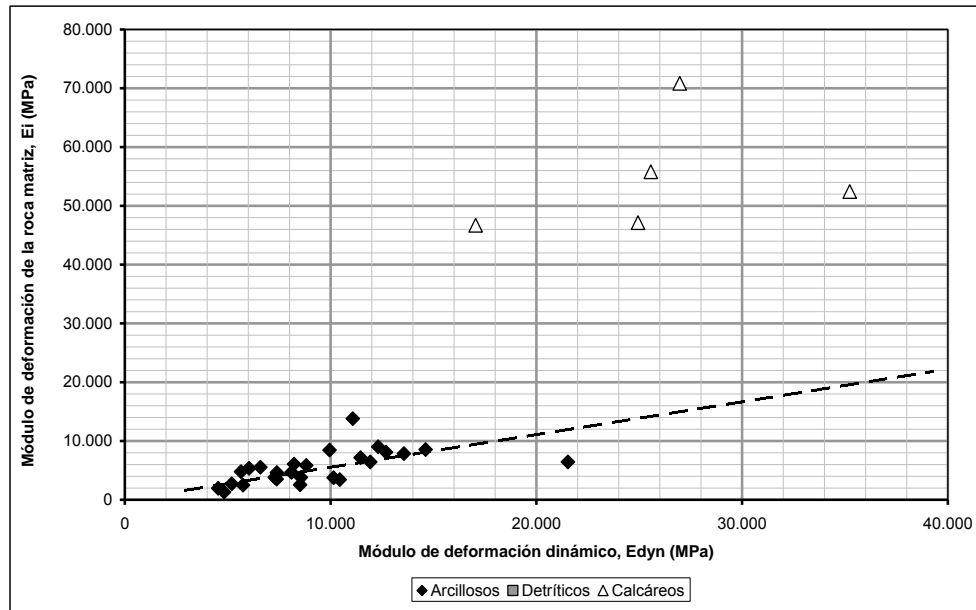


Figura 5-22. Relación entre el módulo de deformación dinámico y el estático.

De manera análoga a como se realizó para el módulo estático (véase Figura 5-10) se ha buscado la relación entre el módulo dinámico y la resistencia a compresión simple de las diferentes litologías (Figura 5-23). De manera general, las tres litologías muestran una relación  $E_{dyn}/RCS$  de entre 500 y 1000, llegando a los 5000 en el caso de los materiales arcillosos.

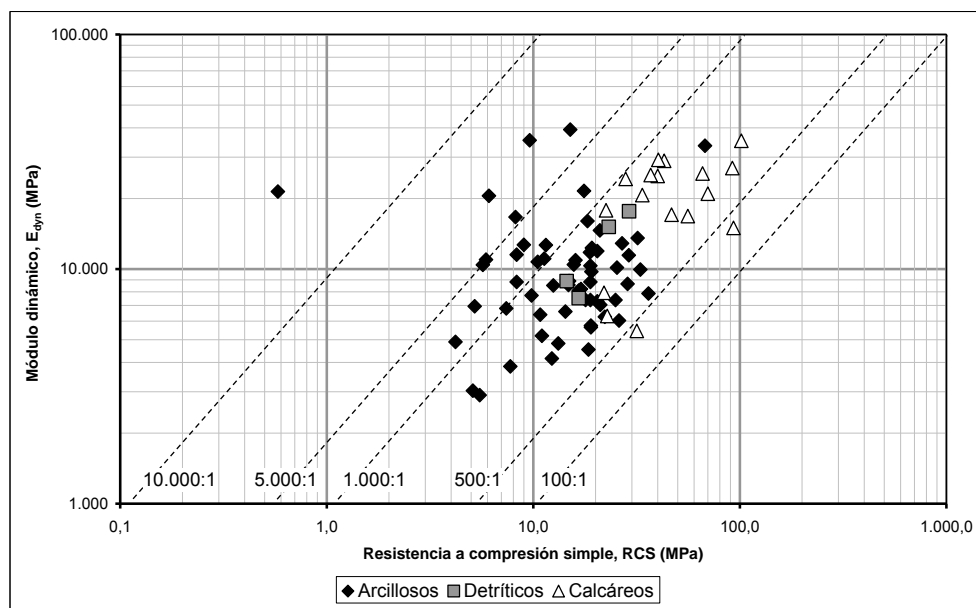


Figura 5-23. Relación entre el módulo de deformación dinámico y la resistencia a compresión simple.

#### 5.2.1.3.2 Ensayos de campo

A fin de determinar el comportamiento deformacional de estos materiales a escala de macizo rocoso o al menos a una escala mayor que la del laboratorio, se realizaron ensayos presiométricos y ensayos de carga con *grippers*.

En la Tabla 5-17 y Figura 5-24 se han recogido los datos representativos de un total de 94 ensayos presiométricos realizados en materiales de la Unidad de Algeciras. No existen datos en materiales detríticos.

Tabla 5-17. Módulo presiométrico de los materiales de la Unidad de Algeciras.

Parámetro	Módulo presiométrico, $E_p$ (MPa)			
	Litología	Global	Arcillosos	Detríticos
n		94*	55	-
Máximo		6371	5456	-
Mínimo		48	48	-
$\mu$		1398,5	1223,5	-
$\sigma$		1505,8	1235,2	-
$\nu$		1,08	1,02	-
Distribución		LOG.NORMAL	LOG.NORMAL	-
$X_{k,inf}$		1155	951	-
$X_{k,sup}$		1694	1574	-
Percentil 05		124	109	-
Percentil 95		5077	4557	-
Error mínimo		-	25 %	-

(\*) alguno de los ensayos no puede asignarse a una sola litología

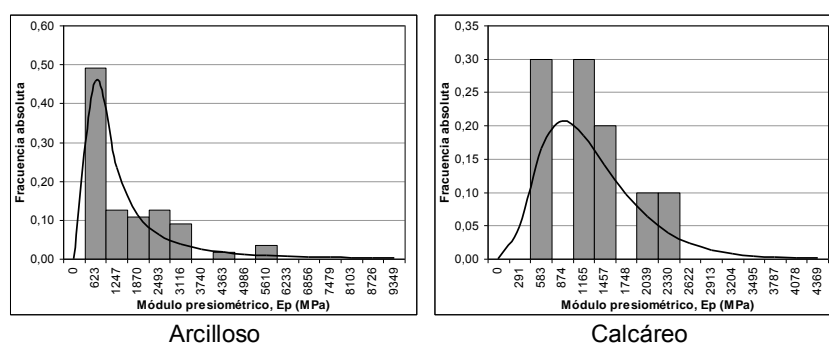


Figura 5-24. Módulo presiométrico de los materiales de la Unidad de Algeciras.

Los módulos presiométricos medidos muestran una grandísima variabilidad, sobre todo en el caso de los materiales arcillosos ( $\nu=1,09$ ). Al tratarse de ensayos a escala de macizo, estos datos recogen la variabilidad debida a los diferentes estados de fracturación y alteración que puede mostrar la unidad, correspondiéndose, muy posiblemente, los valores más bajos a las zonas más alteradas y fracturadas y los más altos a zonas con matriz rocosa sana y sin presencia de fisuras.

Como se comentó anteriormente, durante la excavación de la galería de Tarifa se aprovechó para medir la deformación debida al apoyo de los *grippers* de la tuneladora contra las paredes de la excavación. Estas medidas se analizaron de manera análoga a un ensayo de carga con placa (Tabla 5-18 y Figura 5-25). Ninguno de los ensayos se realizó sobre materiales detríticos.

Tabla 5-18. Módulo de deformación con *grippers* de los materiales de la Unidad de Algeciras

Parámetro	Módulo de deformación con grippers, E <sub>g</sub> (MPa)			
Litología	Global	Arcillosos	Detríticos	Calcáreos
n	16	6	-	10
Máximo	2266	1457	-	2266
Mínimo	63	283	-	63
μ	911,4	822,5	-	964,7
σ	667,9	431,5	-	771,0
υ	0,76	0,57	-	0,84
Distribución	GAMMA	-	-	GAMMA
X <sub>k,inf</sub>	619	468	-	518
X <sub>k,sup</sub>	1204	1177	-	1412
Percentil 05	140	-	-	129
Percentil 95	2239	-	-	2447
Error mínimo	-	-	-	> 25 %

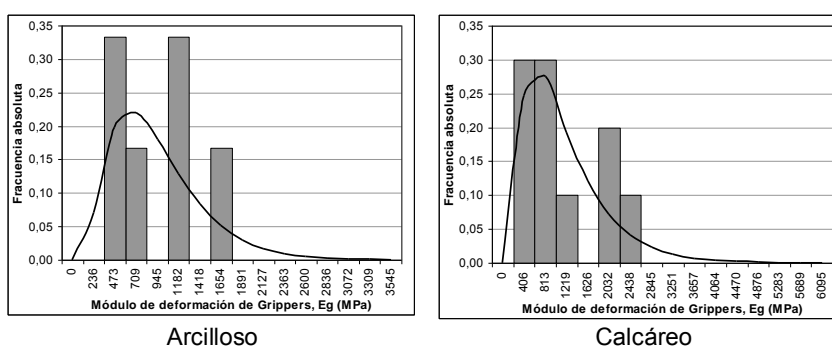


Figura 5-25. Módulo de deformación con grippers de los materiales de la Unidad de Algeciras

Estos valores han de tomarse, al menos *a priori*, como meramente estimativos ya que este tipo de ensayos no está normalizado. Esto unido al escaso número de datos impide un análisis más en profundidad.

#### 5.2.1.4 Hinchamiento

Para conocer el potencial de hinchamiento de esta unidad, varias muestras de materiales arcillosos fueron sometidas a ensayos de hinchamiento libre y edométricos (Tabla 5-19 y Figura 5-26).

Tabla 5-19. Hinchamiento de las litologías arcillosas de la Unidad de Algeciras.

Parámetro	Hinchamiento libre (%)	Presión de hinchamiento (kPa)
	Arcillosos	Arcillosos
n	14	13
Máximo	17,30	350,00
Mínimo	0,16	12,00
$\mu$	6,60	152,46
$\sigma$	4,01	110,55
$\nu$	0,63	0,75
Distribución	NORMAL	GAMMA
$X_{k,inf}$	4,70	97,82
$X_{k,sup}$	8,50	207,10
Percentil 05	0,00	23,42
Percentil 95	13,71	374,58
Error mínimo	25 %	> 25 %

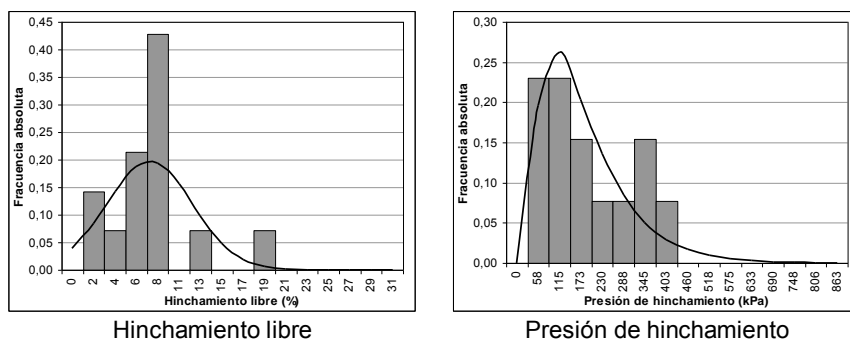


Figura 5-26. Hinchamiento de las litologías arcillosas de la Unidad de Algeciras

Como en otros parámetros analizados se observa una importante variabilidad en los resultados debido, en este caso, principalmente a una variabilidad litológica y a un número escaso de ensayos. Los datos indican, al menos, la presencia de zonas con grados de expansividad muy altos (hinchamiento libre de 17 % o presiones de hinchamiento de hasta 350 kPa) que han de tenerse en cuenta.

#### 5.2.1.5 Durabilidad

La durabilidad de estos materiales fue evaluada mediante ensayos de sequedad-humedad-desmoronamiento, denominados comúnmente como Se-Hu-Des o *Slake Durability Test* (Tabla 5-20 y Figura 5-27). No hay ensayos realizados en materiales calcáreos.

Tabla 5-20. Valores representativos de los ensayos SeHuDes en la Unidad de Algeciras.

Parámetro	Índice de desmoronamiento, $I_{D2}$ (%)			
	Litología	Global	Arcillosos	Detríticos
n		25	15	10
Máximo		99,20	99,20	98,80
Mínimo		64,20	64,20	91,90
$\mu$		96,02	95,37	97,00
$\sigma$		6,69	8,41	2,03
$\nu$		0,07	0,09	0,02
Distribución		NORMAL	NORMAL	NORMAL
$X_{k,inf}$		93,73	91,54	95,82
$X_{k,sup}$		98,31	99,20	98,18
Percentil 05		84,58	80,55	93,27
Percentil 95		107,47	110,19	100,73
Error mínimo		-	5 %	5 %

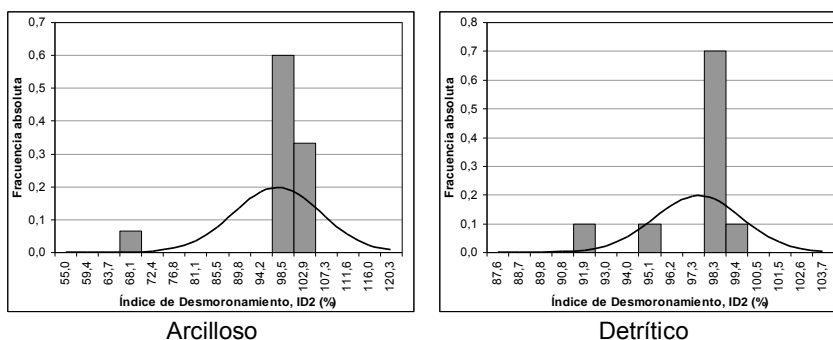


Figura 5-27. Durabilidad de los materiales de la Unidad de Algeciras.

En general, la durabilidad de los materiales es alta. Los valores mínimos que se pueden observar en los materiales arcillosos se corresponden con ensayos realizados en pelitas rojas que muestran una durabilidad menor que el resto de las litologías. Según la norma NLT-251/91 (CEDEX, 1992a), los materiales detríticos y arcillosos se clasificarían como de alta a muy alta durabilidad si exceptuamos a las pelitas rojas que, muestran (con los pocos datos disponibles) una durabilidad media.

Si bien no hay datos sobre la durabilidad de las litologías calcáreas se puede suponer para ellas una durabilidad alta o muy alta.

### 5.2.1.6 Permeabilidad

Los valores de permeabilidad *in situ* medidos en esta unidad son muy variables (Tabla 5-21 y Figura 5-28). Debido a que en uno de estos ensayos pueden verse involucradas más de una litología, no se ha realizado un análisis individual de cada una de ellas y se han analizado todos los datos en su conjunto.

Tabla 5-21. Ensayos de permeabilidad *in situ* de la Unidad de Algeciras.

Parámetro	Ensayos Lefranc (-log(m/s))	Ensayos Lugeon (u.l.)
Litología	Global	Global
n	11	44
Máximo	12,00	100,00
Mínimo	6,70	0,00
$\mu$	9,40	9,04*
$\sigma$	2,40	25,01*
$\nu$	0,27	2,80*
Distribución	LOG.NORMAL	GAMMA
$X_{k,inf}$	8,11	2,70*
$X_{k,sup}$	10,89	15,38*
Percentil 05	5,84	0,61*
Percentil 95	14,17	26,03*
Error mínimo	10 %	10 %

(\*) Valor aproximado suponiendo 100 u.l. para resultados ">100 u.l." y 0 para resultado de "impermeable".

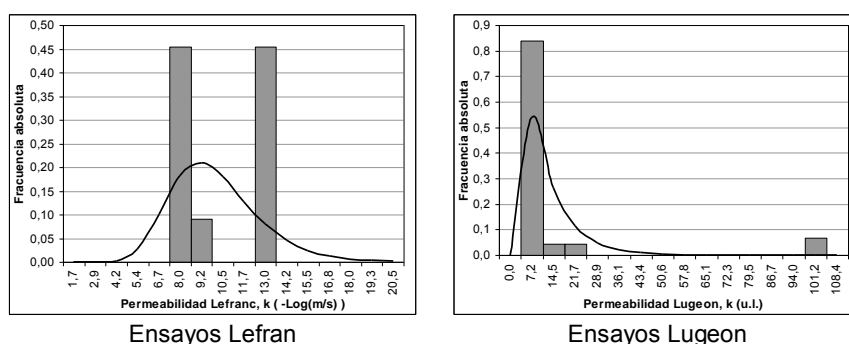


Figura 5-28. Permeabilidad de la Unidad de Algeciras.

Los resultados de los ensayos Lugeon clasifican los diferentes macizos rocosos ensayados desde muy impermeables a muy permeables (Olalla y Sopeña, 1991). Por su parte, los ensayos Lefranc indican una importante variabilidad de la permeabilidad, entre  $2 \cdot 10^{-7}$  y  $10^{-12}$  m/s. Esta gran variabilidad puede explicarse por la variabilidad litológica de esta unidad, correspondiéndose las permeabilidades más altas ( $\sim 10^{-7}$  m/s) a las zonas fracturadas de las litologías más rígidas (calizas y areniscas) y las permeabilidades más bajas ( $\sim 10^{-12}$  m/s) asociadas a los tramos arcillosos.



### 5.2.2 Unidad de Bolonia (Tala Lakrah)

Los datos recopilados de esta unidad pertenecen a ensayos realizados sobre materiales argilíticos, limolíticos y calcáreos.

#### 5.2.2.1 *Propiedades elementales*

En la Tabla 5-22 y la Figura 5-29 se muestran los valores representativos de los ensayos recopilados. Estos datos no contienen ningún ensayo realizado sobre materiales calizos.

Tabla 5-22. Peso específico seco de la Unidad de Bolonia por litologías.

Parámetro	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )			
	Global	Argilita	Limolita	Calcáreos
n	30	21	<b>9</b>	-
Máximo	21,90	18,80	21,90	-
Mínimo	14,70	14,70	19,00	-
$\mu$	18,44	17,59	20,42	-
$\sigma$	1,66	1,01	1,11	-
$\nu$	0,09	0,06	0,06	-
Distribución	LOG.NORMAL	NORMAL	-	-
$X_{k,inf}$	17,92	17,21	19,87	-
$X_{k,sup}$	18,97	17,97	20,97	-
Percentil 05	15,79	15,85	-	-
Percentil 95	21,36	19,33	-	-
Error mínimo	-	5 %	-	-

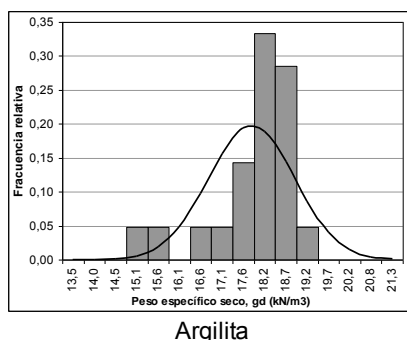


Figura 5-29. Peso específico de los materiales de la Unidad de Bolonia.

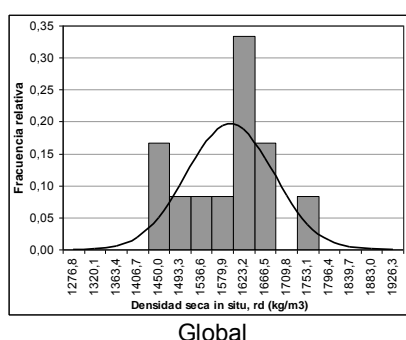
Analizando los datos en su conjunto la desviación estándar es excesivamente grande debido a la variabilidad de las litologías representadas. Por esto se han separado los ensayos en función de la litología de la muestra.

Estos datos muestran un mayor peso específico de las limolitas con un peso específico seco medio de unos 20,4 kN/m<sup>3</sup>, siendo de 17,6 kN/m<sup>3</sup> para las argilitas. La humedad de las muestras es muy variable y no parece corresponderse con humedades naturales sino con humedades de muestras desecadas. La humedad natural se encontraría más cerca de los valores máximos que de la media, pudiendo darse valores de en torno al 20 %.

Por otra parte, se han determinado las densidades *in situ* por el método de la arena (Tabla 5-23 y Figura 5-30).

Tabla 5-23. Densidad *in situ* de los materiales arcillosos de la Unidad de Bolonia.

Parámetro	Densidad <i>in situ</i> (kg/m <sup>3</sup> )			
Litología	Global	Argilita	Limolita	Calcarenita
n	12	6	6	-
Máximo	1710	1660	1710	-
Mínimo	1450	1570	1450	-
μ	1574,17	1613,33	1535	-
σ	82,91	31,45	98,4	-
ν	0,06	0,02	0,07	-
Distribución	NORMAL	-	-	-
X <sub>k,inf</sub>	1531	1598	1486	-
X <sub>k,sup</sub>	1617	1629	1584	-
Percentil 05	1425	-	-	-
Percentil 95	1723	-	-	-
Error mínimo	-	-	-	-

Figura 5-30. Densidad seca *in situ* de la Unidad de Bolonia.

Los valores de densidad *in situ* son claramente inferiores a los determinados en el laboratorio. Esto puede deberse a la alteración del material ya que los ensayos se realizaron en puntos muy cercanos a la superficie.

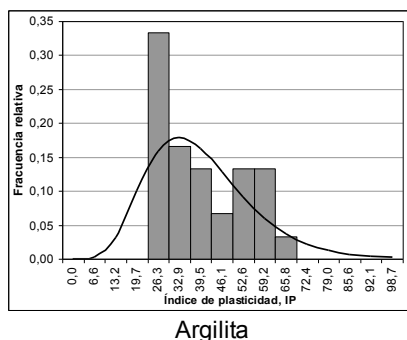
### 5.2.2.2 Plasticidad

Los datos de plasticidad recopilados son muy semejantes a los de las otras unidades estudiadas (Figura 5-6). La mayoría de los ensayos muestran arcillas tipo CH o CL con una disposición paralela a la línea A y justo por encima de ésta (Figura 5-32).

Tabla 5-24. Índice de plasticidad de la Unidad de Bolonia por litologías

Parámetro	IP			
Litología	Global	Argilita	Limolita	Calcáreos
n	39	30	6	-
Máximo	65,10	65,10	23,70	-
Mínimo	16,30	20,10	16,30	-
μ	33,33	36,27	18,63	-
σ	13,56	12,94	2,70	-
ν	0,41	0,36	0,16	-
Distribución	LOG.NORMAL	GAMMA	-	-
X <sub>k,inf</sub>	29,86	32,26	17,28	-
X <sub>k,sup</sub>	37,21	40,28	19,98	-
Percentil 05	15,92	14,68	-	-
Percentil 95	59,57	65,66	-	-
Error mínimo	-	10 %	-	-

En la Figura 5-31 se muestra la distribución de los datos para los materiales argilíticos y para el global de la unidad:



Argilita

Figura 5-31. Índice de plasticidad de la Unidad de Bolonia.

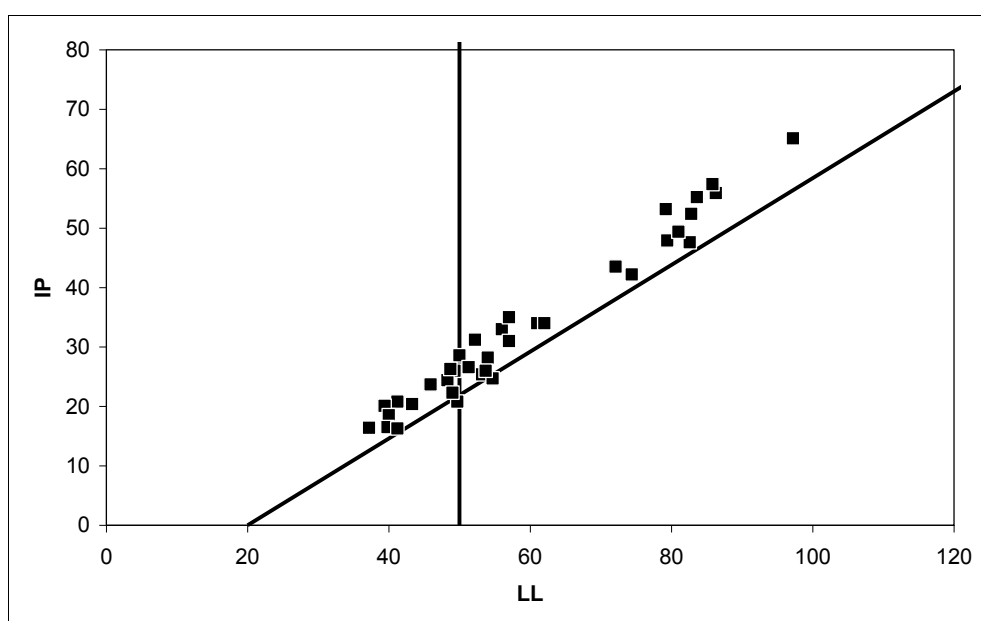


Figura 5-32. Gráfico de plasticidad de la Unidad de Bolonia

### 5.2.2.3 Resistencia y deformabilidad

Para esta unidad se cuentan con ensayos tanto de laboratorio como de campo:

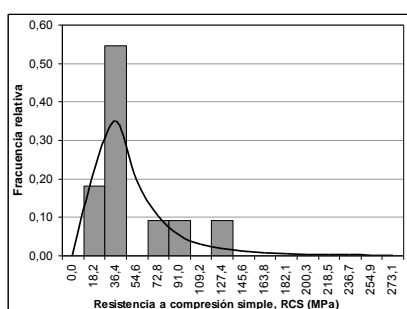
#### 5.2.2.3.1 Ensayos de laboratorio

Al igual que se ha hecho anteriormente, las características resistentes y deformacionales de esta unidad se han determinado, por separado, para cada una de las diferentes litologías ya que estas características son notablemente diferentes en cada una de ellas.

Para la caracterización de la roca matriz se han realizado dos tipos de ensayos: ensayos de resistencia a compresión simple (RCS) y ensayos de resistencia a la carga puntual (PLT). En la Tabla 5-25 y la Tabla 5-26 se muestran, agrupados por litologías, los parámetros representativos de estos ensayos. En la Figura 5-33 y la Figura 5-34 se muestra la distribución de estos los datos.

Tabla 5-25. Resistencia a compresión simple de la Unidad de Bolonia por litologías.

Parámetro	RCS (MPa)			
	Global	Argilita	Limolita	Calcarenita
n	17	6	11	-
Máximo	124,90	122,30	124,90	-
Mínimo	13,70	51,10	13,70	-
$\mu$	58,06	87,18	42,18	-
$\sigma$	37,36	20,84	34,72	-
$\nu$	0,66	0,26	0,86	-
Distribución	GAMMA	-	LOG.NORMAL	-
$X_{k,inf}$	42,24	76,76	28,29	-
$X_{k,sup}$	73,88	97,60	62,89	-
Percentil 05	11,27	-	9,65	-
Percentil 95	134,62	-	106,86	-
Error mínimo	-	-	> 25 %	-



Limolita

Figura 5-33. Distribución estadística de la resistencia a compresión simple en la Unidad de Bolonia

Tabla 5-26. Resistencia a la carga puntual de Unidad de Bolonia por litologías

Parámetro	Is <sub>50</sub> (MPa)			
	Global	Argilita	Limolita	Calcarenita
n	84	33	35	16
Máximo	5,70	5,70	4,27	5,46
Mínimo	0,03	0,03	0,07	0,08
$\mu$	1,28	0,99	1,16	2,14
$\sigma$	1,32	1,27	0,96	1,70
$\nu$	1,04	1,29	0,84	0,82
Distribución	GAMMA	LOG.NORMAL	LOG.NORMAL	GAMMA
$X_{k,inf}$	1,04	0,63	0,90	1,39
$X_{k,sup}$	1,52	1,55	1,49	2,89
Percentil 05	0,15	0,03	0,18	0,25
Percentil 95	3,33	5,10	3,66	5,56
Error mínimo	-	> 25 %	> 25 %	25 %

Valor medio del Is<sub>50</sub> obtenido eliminando los valores extremos, según norma UNE 22950-5:1996 (AENOR, 1996b).

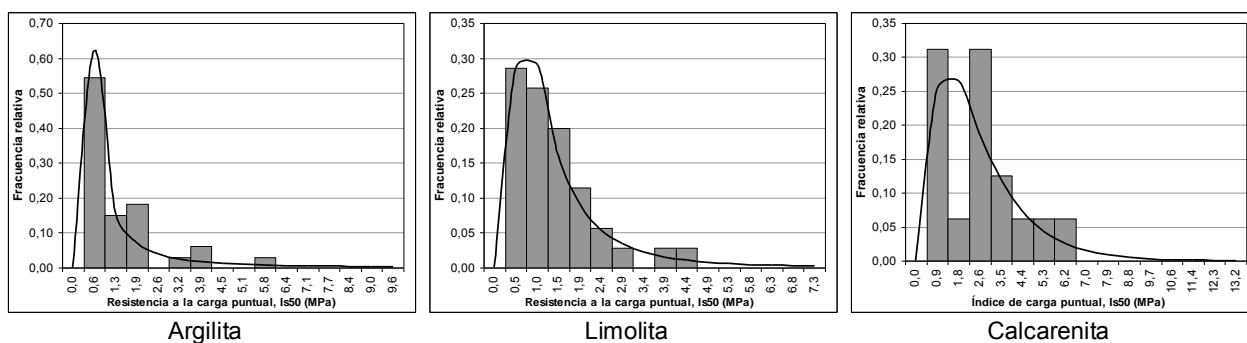


Figura 5-34. Distribución estadística de la resistencia a la carga puntual de Unidad de Bolonia.

La variabilidad en los ensayos de resistencia a compresión simple es grande, si bien se encuentran dentro de un mismo orden de magnitud. Los valores medios resultan muy altos en comparación con otras unidades, pudiendo deberse a la toma de muestras en zonas especialmente resistentes del macizo rocoso, lo cual incluiría un sesgo importante en los valores medidos. Esto unido al escaso número de datos en comparación con el volumen total de la unidad hace que la fiabilidad de estos valores sea escasa. Además no se cuenta con ningún ensayo de resistencia a compresión simple para las calizas.

Al igual que ocurre en las muestras de la Unidad de Almarchal, los valores obtenidos de la resistencia a carga puntual, difieren de los obtenidos en ensayos de resistencia a compresión simple. En este caso, los valores medios, resultan más bajos que los de RCS, suponiendo una correlación habitual (véase apartado 5.2.4.3).

#### 5.2.2.3.2 Ensayos de campo

Se cuenta con los datos de los ensayos de resistencia al corte *in situ* realizados en las zanjas Z-V (limolitas) y Z-VI (argilita). Estos ensayos dieron los siguientes valores de resistencia suponiendo un criterio de rotura de Mohr-Coulomb:

- Argilita:  $c'=150$  kPa  $\phi'=15^\circ$
- Limolita:  $c'=66$  kPa  $\phi'=43^\circ$

Estos ensayos se realizaron a cotas muy someras (5 - 6 m) con lo que los materiales ensayados pudieron estar afectados por alteración o descompresión superficial. Los valores medios de densidad *in situ*, medidos en las mismas zanjas mediante el método de la arena, son significativamente inferiores a los valores medidos en laboratorio (Tabla 5-22 y Tabla 5-23), lo cual evidencia la alteración de estos materiales. Por tanto, los valores de resistencia obtenidos mediante estos ensayos *in situ* deben de tomarse como propios del material alterado y se supone mayor resistencia para los materiales sanos y no descomprimidos.

Los parámetros deformacionales de estos materiales se determinaron *in situ*, mediante ensayos de carga con placa, en el interior de las mismas zanjas, por tanto, estos parámetros se ven influenciados de la misma manera por la alteración superficial de los materiales arcillosos y minusvaloran su rigidez en estado sano. En la Tabla 5-27 se muestran los valores representativos de estos ensayos.

Tabla 5-27. Valores representativos de los ensayos de carga con placa realizados en la Unidad de Bolonia.

Parámetro	E <sub>PC</sub> (MPa)			
	Global	Argilita	Limolita	Calcarenita
n	12	6	6	-
Máximo	643,00	89,00	643,00	-
Mínimo	14,00	14,00	281,00	-
$\mu$	232,50	30,50	434,50	-
$\sigma$	218,73	26,44	115,68	-
$\nu$	0,98	0,95	0,29	-
Distribución	NORMAL	-	-	-
$X_{k,inf}$	119,10	17,28	376,66	-
$X_{k,sup}$	345,90	43,72	492,34	-
Percentil 05	0,00	-	-	-
Percentil 95	625,32	-	-	-
Error mínimo	-	-	-	-

En el gráfico recogido en la Figura 5-35 muestra la distribución de estos datos:

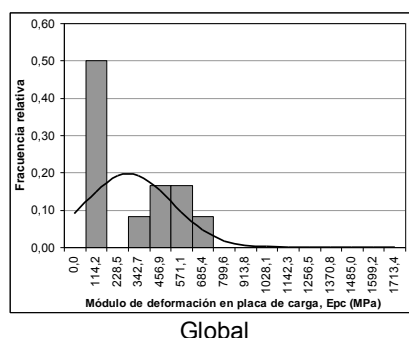


Figura 5-35. Módulo de deformación de la Unidad de Bolonia medido con placa de carga.

Los valores obtenidos presentan una importante variabilidad y son mucho más bajos de lo que cabría esperar para estos materiales en estado sano. No obstante, estos valores pueden ser representativos de los materiales más someros de la unidad y tenidos en cuenta para los cálculos de emboquilles y zonas con escasa cobertera o alteradas.

#### 5.2.2.4 Hinchamiento

Los ensayos recopilados de la Unidad de Bolonia se corresponden con ensayos de hinchamiento en célula Lambe.

En los ensayos recopilados se ha medido el índice de hinchamiento a las 24h en lugar de a las 2h marcadas por la norma UNE 103-600 (AENOR, 1996a). Esto se hizo para permitir una completa saturación de las muestras (CEDEX, 1984). Los parámetros representativos se incluyen en la Tabla 5-28.

Tabla 5-28. Hinchamiento de las diferentes litologías de la Unidad de Bolonia.

Parámetro	Hinchamiento Lambe (kPa)			
	Global	Argilita	Limolita	Calcarenita
n	17	13	<b>4</b>	-
Máximo	1900	1900	1050	-
Mínimo	48	48	690	-
$\mu$	679,00	620,23	870,00	-
$\sigma$	601,30	673,06	129,03	-
$\nu$	0,91	1,13	0,17	-
Distribución	GAMMA	LOG.NORMAL	-	-
$X_{k,inf}$	424,39	336,69	805,48	-
$X_{k,sup}$	933,61	1142,56	934,52	-
Percentil 05	90,37	41,80	-	-
Percentil 95	1722,62	2437,47	-	-
Error mínimo	-	> 25 %	-	-

En la Figura 5-36 se muestra la distribución de los datos para las argilitas de la unidad:

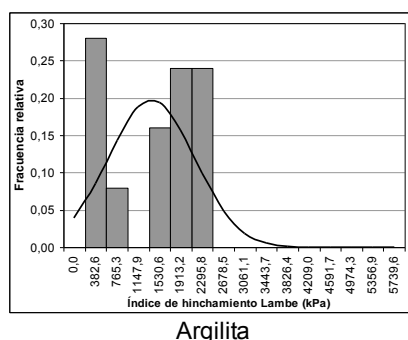


Figura 5-36. Distribución estadística del hinchamiento Lambe en los materiales de la Unidad de Bolonia.

Estos parámetros indican que los materiales pertenecientes a esta unidad presentan, de media, un cambio potencial de volumen marginal en el caso de las limolitas y crítico en el caso de las argilitas. Los valores máximos indican un cambio potencial de volumen muy crítico en el caso de las argilitas y marginal en el de las limolitas.

#### 5.2.2.5 Durabilidad

La durabilidad de estos materiales fue evaluada mediante ensayos de sequedad-humedad-desmoronamiento, denominados comúnmente como Se-Hu-Des o *Slake Durability Test*.

Este ensayo ha sido realizado solamente en materiales argilíticos de esta unidad (Tabla 5-29).

Tabla 5-29. Valores representativos de los ensayos SeHuDes en la Unidad de Bolonia.

Parámetro	$I_{D2}$
n	6
Máximo	61,20
Mínimo	0,60
$\mu$	14,60
$\sigma$	21,03
$\nu$	1,58
Distribución	-
$X_{k,inf}$	4,09
$X_{k,sup}$	25,11
Percentil 05	-
Percentil 95	-
Error mínimo	-

Los datos muestran dispersión si bien, todas las muestras se clasifican, según la norma NLT-251/91, como de baja a muy baja durabilidad (CEDEX, 1992a).

#### 5.2.2.6 Permeabilidad

Son pocos los datos recopilados de permeabilidad de esta unidad. Solamente se cuenta con 3 ensayos Lugeon, todos ellos realizados en materiales argilíticos. Los resultados van desde 0,14 a 0,18 unidades Lugeon, lo que clasificaría estos materiales como muy impermeables (Olalla y Sopeña, 1991). La escasez de los datos recopilados junto con la falta de datos sobre otras litologías de la unidad no permite determinar parámetros de permeabilidad para ella.

### 5.2.3 *Unidad de Facinas (Mellousa)*

Los datos analizados a continuación pertenecen en su gran medida al trabajo realizado por el LPEE (1987) con muestras del sondeo Geo.6 de la primera campaña de sondeos en tierra en la orilla marroquí del estrecho. Estos datos se han completado con los provenientes del estudio de la presa de Battouta (Marruecos) realizado en 1974, y que fueron recopilados por SNED (1983, 1984a).

#### 5.2.3.1 *Propiedades elementales*

En la Tabla 5-30 se muestran los valores representativos del peso específico de los materiales de esta unidad:

Tabla 5-30. Peso específico de la Unidad de Facinas.

Parámetro	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )
n	14
Máximo	20,20
Mínimo	16,40
$\mu$	18,38
$\sigma$	1,18
$\nu$	0,07
Distribución	LOG.NORMAL
Xk,inf	17,81
Xk,sup	18,97
Percentil 05	16,44
Percentil 95	20,47
Error mínimo	5 %

El número de ensayos es muy pequeño para poder considerarlos representativos de toda la unidad si bien, dada la naturaleza de la misma no se esperan valores muy alejados de estos.

#### 5.2.3.2 *Granulometría y plasticidad*

En la Tabla 5-31 y la Figura 5-37 se presentan los parámetros representativos de los ensayos de plasticidad recopilados:

Tabla 5-31. Datos de plasticidad de la Unidad de Facinas.

Parámetro	IP
n	21
Máximo	48
Mínimo	16
$\mu$	32,29
$\sigma$	9,82
$\nu$	0,31
Distribución	NORMAL
Xk,inf	29
Xk,sup	36
Percentil 05	15
Percentil 95	49
Error mínimo	10 %



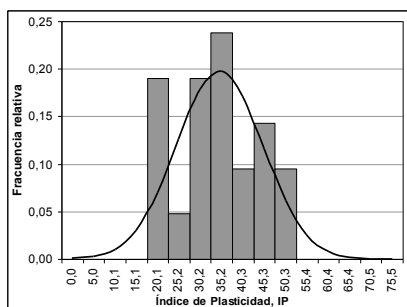


Figura 5-37. Distribución del índice de plasticidad de la Unidad de Facinas

En la Figura 5-38 se ha representado el gráfico de Casagrande con los datos recopilados de la Unidad de Facinas:

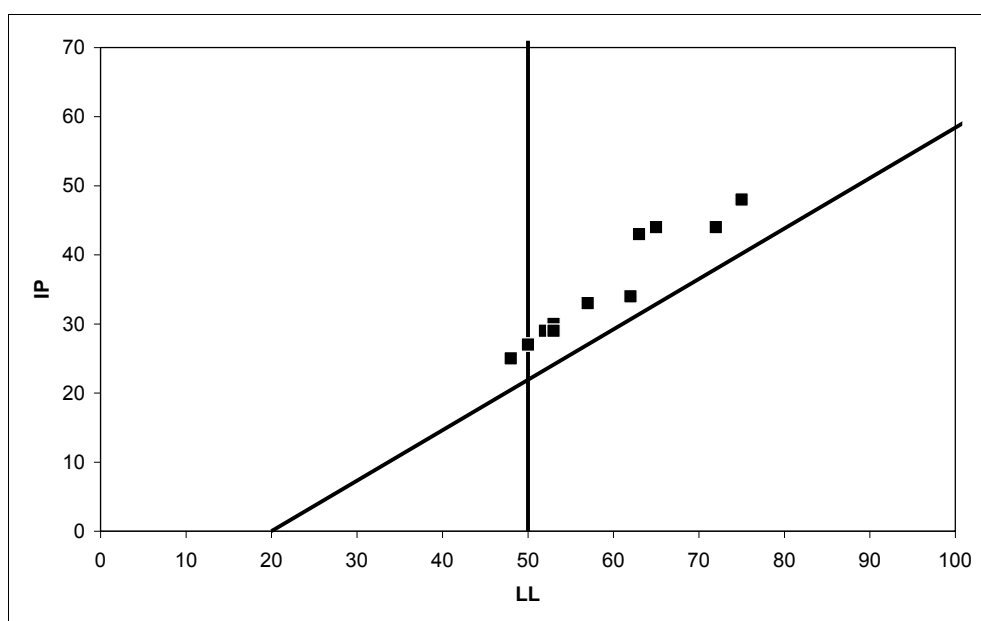


Figura 5-38. Gráfico de plasticidad de la Unidad de Facinas.

De los datos analizados se puede concluir que las muestras estudiadas están formadas principalmente por finos y con porcentaje de arcillas entre el 27 y el 51 % (LPEE, 1987) y, a la vista de la Figura 5-38, con una elevada plasticidad. La actividad de las arcillas varía entre 0,58 y 1,07 (LPEE, 1987) lo que clasificaría estos materiales entre inactivas y normales (González de Vallejo *et al.*, 2002).

### 5.2.3.3 Resistencia y deformabilidad

Los parámetros resistentes de estos materiales se han obtenido en base a ensayos triaxiales. La variabilidad de los datos es grande y el número de datos pequeño (4 con drenaje y 7 sin drenaje), por tanto la fiabilidad de los valores, como representativos de toda la unidad, es baja. Como valores de referencia podrían tomarse:

- Con drenaje:  $c' = 30 \text{ kPa}$   $\phi' = 18^\circ$
- Sin drenaje:  $c_u = 50 \text{ kPa}$   $\phi_u = 10^\circ$

En la estimación de la deformabilidad del macizo rocoso, se han recopilado un total de 53 ensayos presiométricos (Tabla 5-32 y Figura 5-39):

Tabla 5-32. Parámetros representativos de los ensayos presiométricos realizados en la Unidad de Facinas.

Parámetro Profundidad	E <sub>p</sub> (MPa)		
	Todos	< 25 m	≥ 25 m
n	53	44	10
Máximo	160,00	110,0	160,0
Mínimo	1,10	1,1	72,0
μ	44,99	30,85	111,7
σ	41,10	26,53	26,97
υ	0,92	0,87	0,25
Distribución	LOG.NORMAL	LOG.NORMAL	GAMMA
X <sub>k,inf</sub>	35,56	24,59	96,07
X <sub>k,sup</sub>	56,93	38,70	127,33
Percentil 05	5,15	4,81	60,60
Percentil 95	158,31	97,25	175,43
Error mínimo	25 %	25 %	10

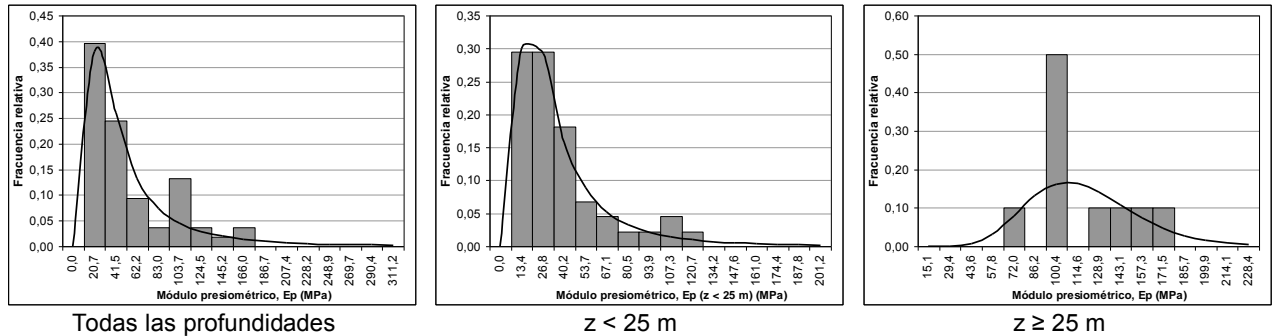


Figura 5-39. Módulo presiométrico de la Unidad de Facinas.

La variabilidad es grande y muchos de los datos son anómalamente bajos para el tipo de materiales estudiados. Para afinar el análisis se han representado los módulos presiométricos (E<sub>p</sub>) en función de la profundidad (Figura 5-40).

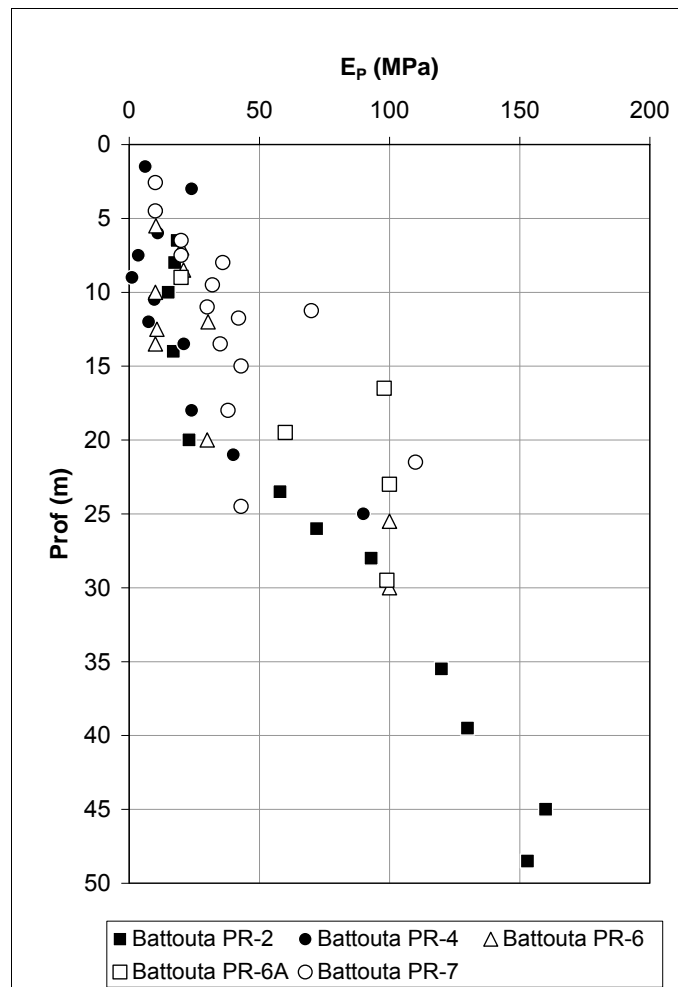


Figura 5-40. Relación entre el módulo presiométrico ( $E_p$ ) y la profundidad.

Como puede observarse en la Figura 5-40, la variabilidad de los módulos medidos en los primeros metros es mayor que en profundidad. Esto puede ser debido a fenómenos de alteración o descompresión del macizo. A la vista de este fenómeno se han agrupado, por un lado los ensayos realizados en la parte más superficial ( $z \leq 25\text{m}$ ) y por el otro los ensayos más profundos ( $z \geq 25\text{m}$ ). En la Tabla 5-32 se recoge el análisis de estos datos.

Los valores medios del módulo presiométrico ( $E_p$ ) para los materiales más sanos es de 110 MPa mientras que para las zonas más someras y alteradas es de 31 MPa. A partir de este módulo presiométrico y suponiendo un parámetro  $\alpha$  (Ménard, 1975) de 1/2 (roca fracturada) se puede suponer, en base a los ensayos presiométricos, un valor del módulo de deformación medio para el macizo rocoso ( $E_c$ ) de entorno a los 200 MPa para los materiales más sanos ( $z \geq 25\text{m}$ ) y de aproximadamente 60 MPa para los más someros y alterados ( $z < 25\text{m}$ ).

#### 5.2.3.4 Consolidación e Hinchamiento

En la Tabla 5-33 se muestran los parámetros representativos de los resultados obtenidos en ensayos edométricos:

Tabla 5-33. Ensayos edométricos de la Unidad de Facinas.

Parámetro	$C_v$	$C_s$	$P_H$ (kPa)
n	5	5	5
Máximo	0,63	0,24	800
Mínimo	0,17	0,07	450
$\mu$	0,36	0,16	624
$\sigma$	0,20	0,06	114
$\upsilon$	0,62	0,41	0,21
Distribución	-	-	-
$X_{k,inf}$	0,26	0,13	567
$X_{k,sup}$	0,46	0,19	681
Percentil 05	-	-	-
Percentil 95	-	-	-
Error mínimo	-	-	-

$C_v$ : Coeficiente de consolidación;  $C_s$ : Coeficiente de entumecimiento;  $P_H$ : Presión de hinchamiento

Las muestras pertenecientes a esta unidad, ensayadas en edómetro han mostrado presiones de hinchamiento variables entre 450 y 800 kPa, con un valor medio de 624 kPa. Esto incluiría los materiales estudiados como de grado IV, con una expansividad muy alta (González de Vallejo *et al.*, 2002).

Como puede verse en la Figura 5-41, existe una clara relación lineal directa entre el índice de plasticidad ( $I_P$ ) y los coeficientes de entumecimiento ( $C_s$ ) y consolidación ( $C_v$ ).

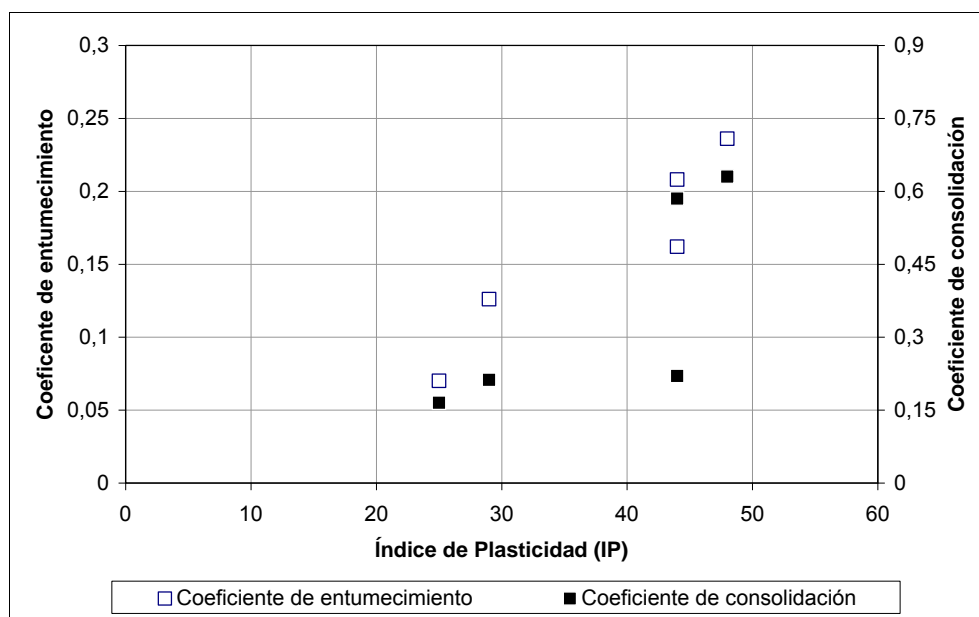


Figura 5-41. Relación entre IP y los coeficientes de entumecimiento y consolidación para la U. Facinas

### 5.2.3.5 Permeabilidad

En los documentos revisados no se ha encontrado ningún ensayo de permeabilidad *in situ*, ni en laboratorio. No obstante, en la recopilación de datos de la presa de Battouta (SNED, 1983) se indica una permeabilidad de entre  $10^{-8}$  y  $10^{-9}$  m/s. Este valor es congruente con el carácter arcilloso de la unidad.

5.2.4 **Unidad de Almarchal (Tanger)**

Como se ha visto en detalle en capítulos anteriores, esta unidad está compuesta por argilitas y margas con pequeñas intercalaciones turbidíticas calcáreas. A continuación se presentan los principales datos geotécnicos analizados:

5.2.4.1 *Propiedades elementales*

A continuación se muestran los valores representativos de los ensayos recopilados (Tabla 5-34) y las distribuciones estadísticas de estos parámetros (Figura 5-42):

Tabla 5-34. Parámetros de estado de la Unidad Almarchal.

Parámetro	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	e
n	34	151	34	34
Máximo	24,54	26,00	28,71	0,61
Mínimo	21,23	14,10	26,50	0,24
$\mu$	22,72	19,52	27,75	0,40
$\sigma$	0,76	2,51	0,51	0,09
$\upsilon$	0,03	0,13	0,02	0,22
Distribución	NORMAL	LOG.NORMAL	LOG.NORMAL	LOG.NORMAL
$X_{k,inf}$	22,51	19,19	27,61	0,38
$X_{k,sup}$	22,93	19,86	27,90	0,43
Percentil 05	21,47	15,69	26,91	0,27
Percentil 95	23,96	23,90	28,61	0,56
Error mínimo	5 %	5 %	5 %	10 %

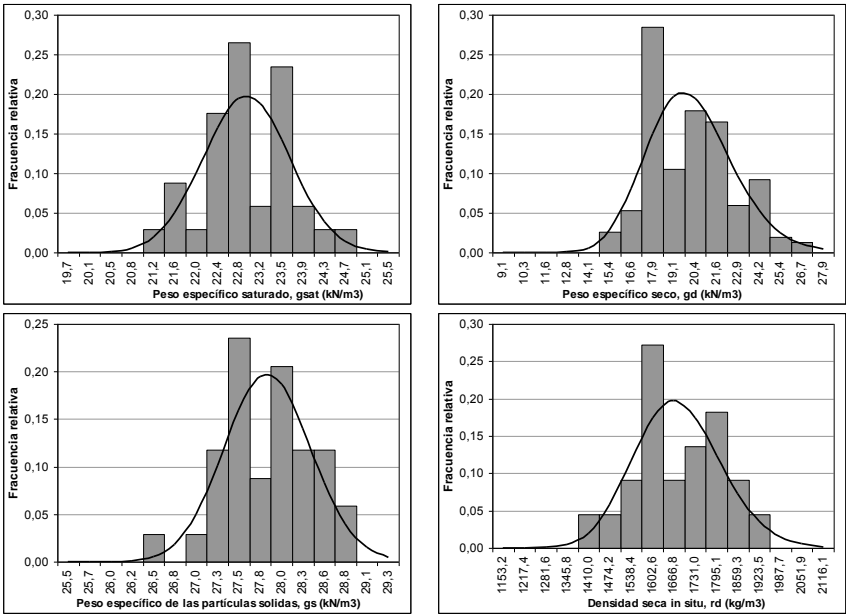


Figura 5-42. Distribución estadística de los parámetros de estado de la Unidad de Almarchal.

Teniendo en cuenta que la mayor parte del proyecto discurre bajo el nivel del mar se puede suponer que el peso específico aparente coincidirá con el saturado.

En la Tabla 5-35 se recogen los valores representativos de la densidad seca *in situ* medida con el método de la arena.

Tabla 5-35. Densidad *in situ* de los materiales de la Unidad de Almarchal.

Parámetro	Densidad <i>in situ</i> seca (kg/m <sup>3</sup> )
n	22
Máximo	1860,0
Mínimo	1410,0
$\mu$	1648,2
$\sigma$	125,4
$\nu$	0,08
Distribución	LOG.NORMAL
$X_{k,inf}$	1601
$X_{k,sup}$	1696
Percentil 05	1444
Percentil 95	1870
Error mínimo	5 %

La distribución estadística de estos datos se muestra en la Figura 5-43:

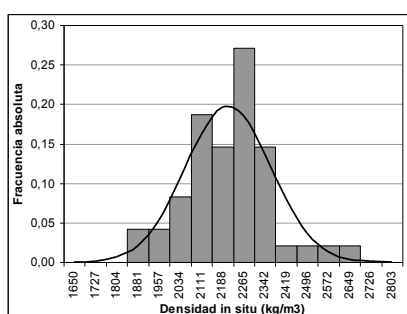


Figura 5-43. Densidad *in situ* de los materiales de la Unidad de Almarchal

El valor medio de 1650 kg/m<sup>3</sup> es más bajo que el correspondiente a la roca matriz ( $\gamma_d=19,5$  kN/m<sup>3</sup>) pudiendo deberse a la alteración y descompresión de los materiales en cotas someras (<5 m).

#### 5.2.4.2 Granulometría y Plasticidad

Los datos sobre la granulometría de la unidad no son muy numerosos. Como se recoge en la Tabla 5-36 y la Figura 5-44, la mayor parte de los componentes pertenecen a la fracción fina (<0,08 mm):

Tabla 5-36. Contenido en finos de la Unidad de Almarchal.

Parámetro	Contenido en finos (%)
n	18
Máximo	96,71
Mínimo	62,35
$\mu$	84,69
$\sigma$	9,09
$\nu$	0,11
Distribución	NORMAL

Parámetro	Contenido en finos (%)
$X_{k,inf}$	80,96
$X_{k,sup}$	88,42
Percentil 05	68,87
Percentil 95	100,00
Error mínimo	5 %

En la Figura 5-44 se muestra la distribución de estos datos.

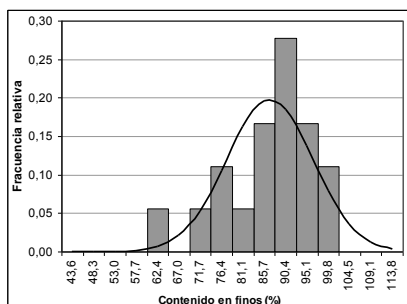


Figura 5-44. Distribución estadística del contenido en finos de la Unidad de Almarchal

Por otro lado, los ensayos de plasticidad muestran resultados parecidos al resto de las formaciones estudiadas (Tabla 5-37 y Figura 5-45):

Tabla 5-37. Índice de plasticidad de la Unidad de Almarchal.

Parámetro	Índice de Plasticidad
n	85
Máximo	118,30
Mínimo	14,00
$\mu$	40,67
$\sigma$	19,61
$\nu$	0,49
Distribución	LOG.NORMAL
$X_{k,inf}$	37,44
$X_{k,sup}$	44,18
Percentil 05	17,04
Percentil 95	78,33
Error mínimo	10 %

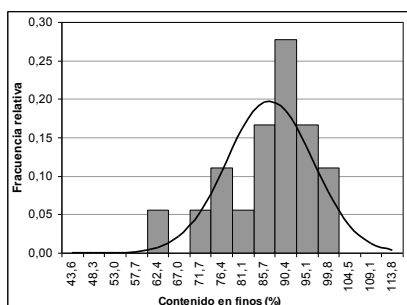


Figura 5-45. Distribución estadística del índice de plasticidad de la Unidad de Almarchal.

En la Figura 5-46 se muestra el gráfico de Casagrande en el que se han representado los valores obtenidos en estos ensayos.

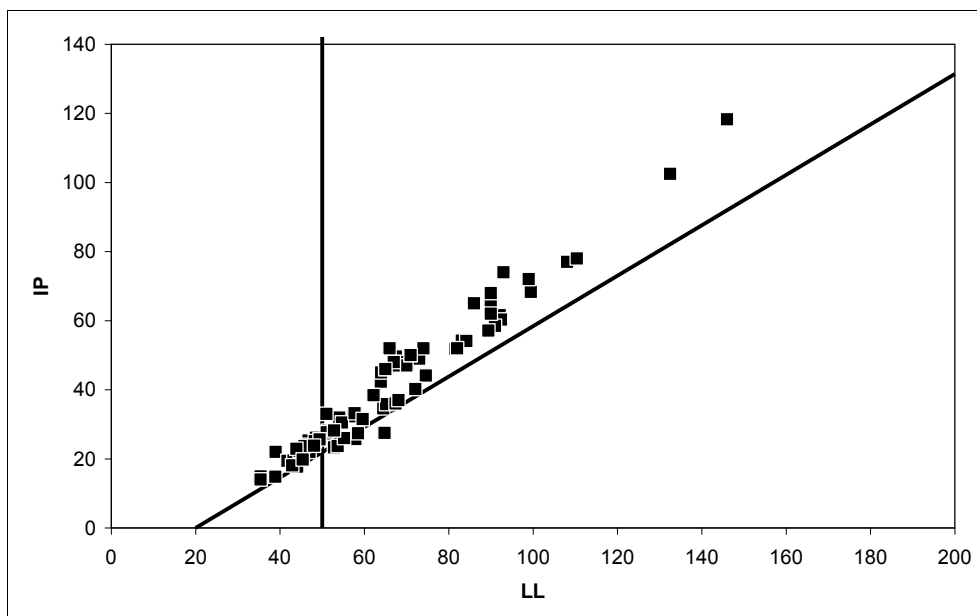


Figura 5-46. Gráfico de plasticidad de la Unidad de Almarchal.

Como puede observarse las muestras analizadas se pueden clasificar como CH o CL con una distribución paralela a la línea A y algo por encima de ésta. La plasticidad es algo mayor que en las otras unidades estudiadas.

#### 5.2.4.3 Resistencia y deformabilidad

La resistencia y la deformabilidad de esta unidad han sido ensayadas mediante diferentes técnicas tanto de laboratorio como de campo. A continuación se recogen los parámetros obtenidos.

##### 5.2.4.3.1 Ensayos de laboratorio

La resistencia de la roca matriz de la Unidad de Almarchal ha sido evaluada en base a ensayos de compresión uniaxial, de carga puntual, triaxiales y de corte directo.

##### 5.2.4.3.1.1 Ensayos de resistencia a compresión simple y carga puntual

Una de las campañas de ensayos realizadas por la Universidad de Oviedo aporta valores de RCS muy superiores a los obtenidos en el resto de las campañas (UNIOVI, 1987). Estos valores, un orden de magnitud por encima del resto, se consideran anómalos y no representativos del comportamiento general de la unidad por lo que se decide no tenerlos en cuenta. En la Tabla 5-38 se recogen los valores representativos de los ensayos de RCS realizados, una vez excluida esta campaña.



Tabla 5-38. Ensayos de compresión uniaxial y carga puntual en la Unidad de Almarchal.

Parámetro	RCS (MPa)	E (MPa)	Is <sub>50</sub> * (MPa)
n	25	22	67
Máximo	1,02	149,40	5,07
Mínimo	0,10	3,40	0,03
$\mu$	0,35	28,28	0,53
$\sigma$	0,21	33,81	0,92
$\nu$	0,62	1,22	1,75
Distribución	GAMMA	LOG.NORMAL	LOG.NORMAL
X <sub>k,inf</sub>	0,28	19,17	0,39
X <sub>k,sup</sub>	0,42	41,73	0,71
Percentil 05	0,08	2,83	0,01
Percentil 95	0,78	92,54	1,93
Error mínimo	25 %	> 25 %	> 25 %

(\*) Una vez descartados los valores extremos

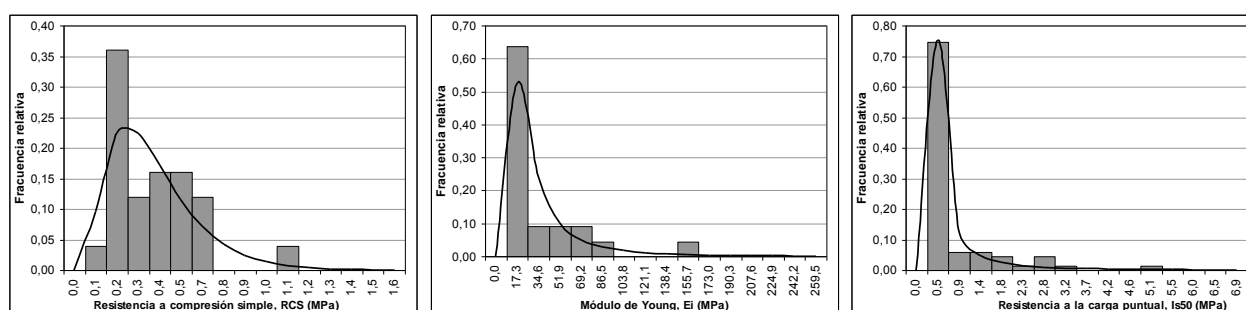


Figura 5-47. Distribución estadística de resistencia y deformabilidad de la roca matriz en U. de Almarchal

Como puede verse en la Figura 5-47 los valores de RCS siguen una distribución gamma, estando el valor medio representativo entre 0,27 y 0,43 MPa, si bien, pueden esperarse valores de hasta 1 MPa. En todo caso, los materiales de esta unidad se encuentran, a lo sumo, en el límite entre suelo duro y roca blanda marcado en 1 MPa (ISRM, 1981).

Los valores medios de resistencia a la carga puntual (Is<sub>50</sub>) son altos en comparación con los ensayos de resistencia a compresión uniaxial si se utiliza la correlación habitual de RCS = 25 Is<sub>50</sub> (Bieniawski, 1989). Para otros autores (Romana, 1999), sin embargo, esta relación es menor y depende de la resistencia a compresión simple. Por otro lado, Franklin y Dussealt (1989) mencionan que esta correlación puede llegar a incluso 50. Goodman (1989) concluye que para rocas débiles esta correlación puede ser “groseramente errónea”. Esto hace que, sin tener una correlación entre ambos ensayos obtenida a partir de ensayos realizados sobre muestras iguales, los valores de resistencia a carga puntual tengan poco utilidad desde el punto de vista de la caracterización de estos materiales.

Observando el valor del módulo relativo (E<sub>i</sub>/RCS), como se observa en la Figura 5-48, gran parte de los valores se encuentran por debajo de 50. Esto puede ser explicado, en primer lugar, por el método de medida de las deformaciones en los ensayos de compresión uniaxial donde no se han realizado medidas directas con bandas extensométricas sino que se han tomado las deformaciones medidas por la prensa de ensayo. Esto, como ocurre en el estudio de Perucho *et al.* (2014), puede llegar a infravalorar el módulo de deformación en materiales arcillosos hasta en un 50 %, dependiendo del material, las tensiones alcanzadas, el acabado de las probetas y el tipo de prensa de ensayo.

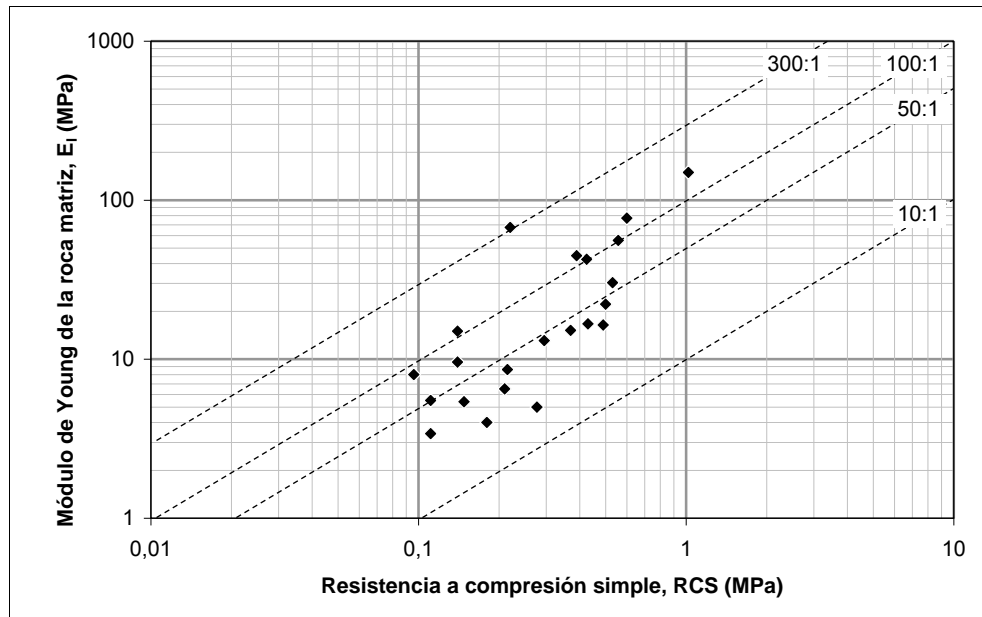


Figura 5-48. Relación entre los módulos de Young de la roca matriz y su resistencia a compresión simple para la unidad de Almarchal.

Deere y Miller (1966) señalan que para rocas sedimentarias arcillosas los índices relativos pueden variar entre 50 y 250. En este caso varias de las muestras presentan módulos relativos por debajo de estos valores, aunque el valor medio es de 75. Esto, junto al impreciso método de medida de las deformaciones en los ensayos justificaría la suposición de módulos superiores a los recogidos en la Tabla 5-38.

#### 5.2.4.3.1.2 Ensayos triaxiales

Varias muestras obtenidas en la galería experimental de Tarifa (fueron utilizadas para la realización de 27 ensayos de resistencia a compresión triaxial consolidados no drenados, TCU (Geocontrol, 1998). Los resultados de estos ensayos se recogen en la Tabla 3-77.

Estos resultados, junto con los ensayos de resistencia a compresión simple, se han utilizado para obtener la envolvente de rotura siguiendo el criterio de Hoek y Brown (Hoek *et al.*, 2002) para el caso del Almarchal arcilloso, donde el número de datos es significativo. Con el fin de analizar el comportamiento de la roca matriz, para la realización de estos cálculos se han descartado aquellos ensayos en los que la rotura de la muestra se produjo claramente por planos de discontinuidad y no a través de la roca intacta. Este ajuste, utilizando el método de Marquardt-Levenberg (Figura 5-49), arrojó los siguientes resultados:

- $m_i = 39$
- $RCS = 0,4 \text{ MPa}$

Si bien, el valor de RCS del ajuste se encuentra en el rango mencionado anteriormente para esta unidad, el valor de  $m_i$  es extremadamente alto si lo comparamos con los valores dados por Hoek (2007) para las rocas arcillosas ( $m_i = 4 \pm 2$ ). Esto podría deberse a una importante heterogeneidad de las muestras o al grado de fracturación que presentan y hace que la aplicabilidad de estos datos sea escasa.

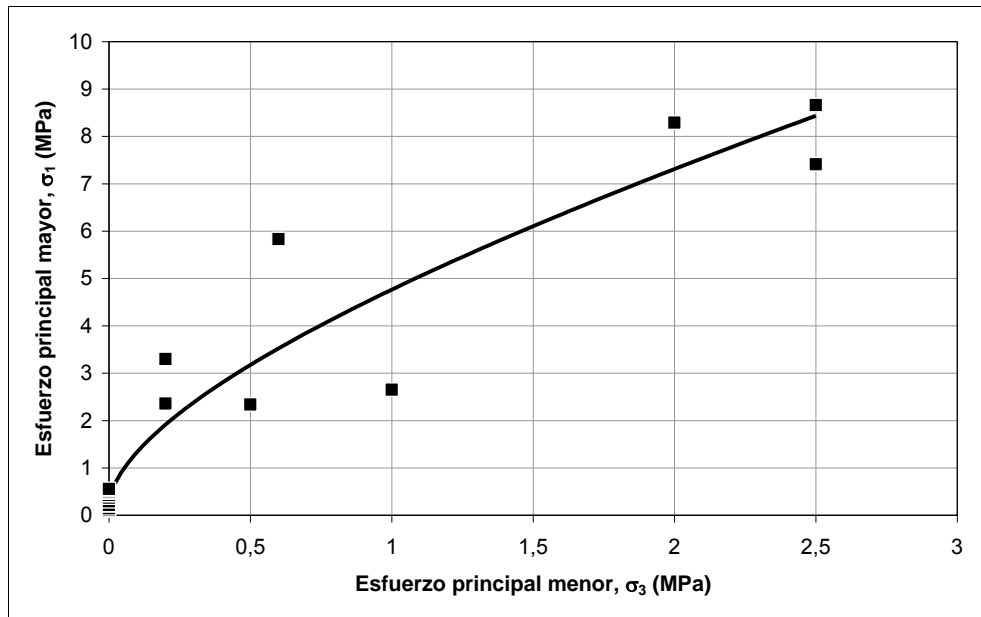


Figura 5-49. Envolvente de rotura de Hoek y Brown para las muestras de Almarchal arcilloso.

Si el mismo ajuste se realiza suponiendo un criterio lineal de Mohr-Coulomb (Figura 5-50), se obtienen los siguientes resultados:

- $c' = 180 \text{ kPa}$
- $\phi = 32^\circ$

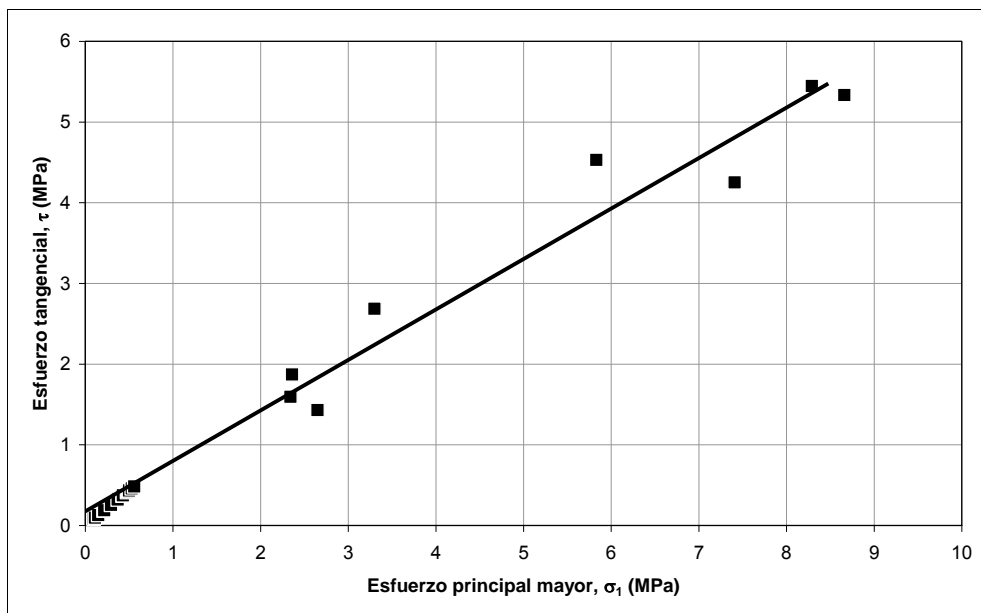


Figura 5-50. Envolvente de rotura de Mohr-Coulomb para las muestras de Almarchal arcilloso.

Este criterio parece ajustar mejor que el criterio no lineal de Hoek y Brown por lo que parece más recomendable su uso.

Por otro lado, con muestras procedentes de las zanjas experimentales Z-I y Z-IV se realizaron una serie de ensayos triaxiales no consolidados - no drenados (TUU) (CEDEX, 1986). Los datos referentes a estos ensayos se muestran en la Tabla 5-39 y en la Figura 5-51:

Tabla 5-39. Ensayos triaxiales UU realizados en muestras de la Unidad de Almarchal.

Parámetro	C <sub>u</sub> (kPa)
n	11
Máximo	420,0
Mínimo	50,0
$\mu$	193,6
$\sigma$	86,9
$\nu$	0,47
Distribución	LOG.NORMAL
X <sub>k,inf</sub>	146,2
X <sub>k,sup</sub>	256,4
Percentil 05	74,8
Percentil 95	405,6
Error mínimo	25 %

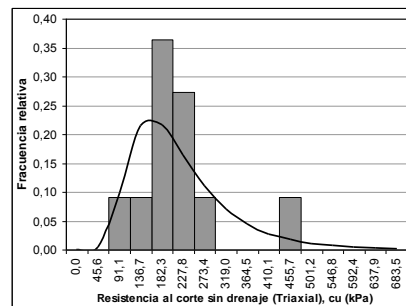


Figura 5-51. Distribución de la resistencia al corte sin drenaje de la roca matriz en la Unidad de Almarchal

A la vista de estos datos se puede tomar una resistencia al corte sin drenaje de unos 150 kPa que estaría en consonancia con los valores dados para la RCS (Tabla 5-38). Si tenemos en cuenta que estas muestras fueron tomadas en zonas muy someras y, como se ha observado en los ensayos de campo (véase apartado 5.2.4.3.2.1) con bajas propiedades geotécnicas debidas a la alteración, los valores tomados para la RCS pueden ser algo conservadores.

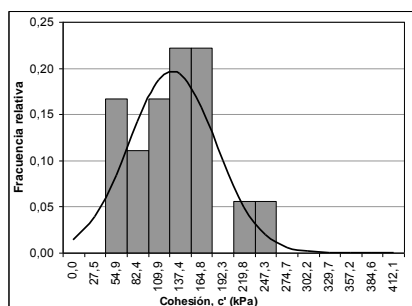
#### 5.2.4.3.1.3 Ensayos de resistencia al corte directo

En este caso se utilizaron muestras provenientes del Pozo de Bolonia (véase apartado 3.1.2) sobre materiales del Almarchal arcilloso (Tabla 5-40 y Figura 5-39). Estas muestras fueron talladas con diferentes direcciones en relación con los planos de laminación (Figura 3-46).

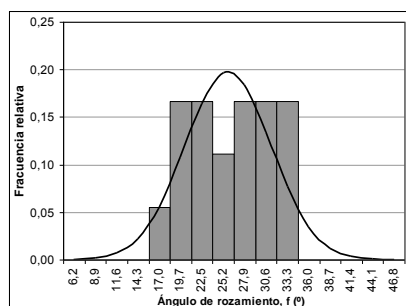
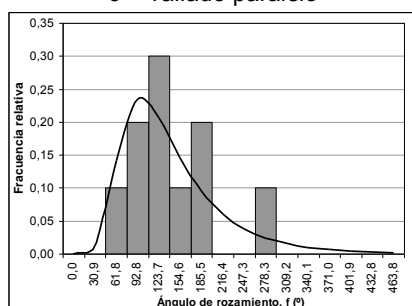
Tabla 5-40. Ensayos de resistencia al corte directo en muestras del Almarchal arcilloso.

Tallado	Paralelo		Perpendicular		Transversal	
Parámetro	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
n	18	18	10	18	9	9
Máximo	235,00	32,74	263,00	32,74	195,00	49,48
Mínimo	41,00	17,04	32,00	17,04	55,00	29,03
$\mu$	113,83	24,43	122,70	24,43	103,00	35,31
$\sigma$	53,40	5,57	58,66	5,26	38,18	5,45
$\nu$	0,48	0,23	0,50	0,22	0,39	0,16
Distribución	NORMAL	NORMAL	LOG.NORMAL	NORMAL	-	-
X <sub>k,inf</sub>	91,93	22,15	89,20	22,27	83,91	32,58
X <sub>k,sup</sub>	135,73	26,71	168,78	26,59	122,09	38,04
Percentil 05	20,94	14,73	43,96	15,27	-	-

Tallado	Paralelo		Perpendicular		Transversal	
Parámetro	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
Percentil 95	206,73	34,12	268,51	33,58	-	-
Error mínimo	25 %	10 %	> 25 %	10 %	-	-



c' - Tallado paralelo

 $\phi$  - Tallado paralelo

c' - Tallado perpendicular

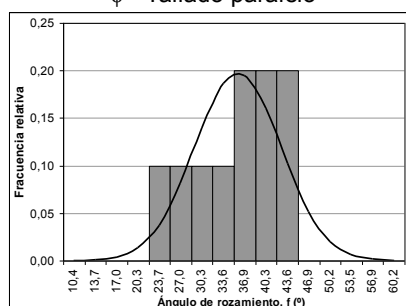
 $\phi$  - Tallado perpendicular

Figura 5-52. Distribución estadística de los parámetros resistentes del Almarchal arcilloso.

A partir de los datos medios se han trazado las envolventes de rotura de Mohr-Coulomb (Figura 5-53).

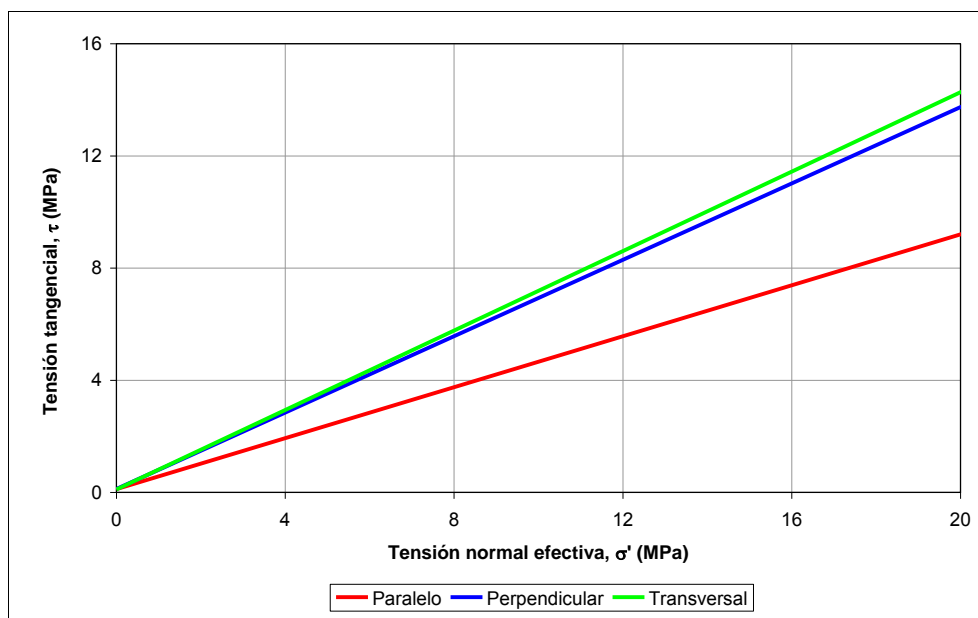


Figura 5-53. Envolventes de rotura de Mohr-Coulomb para los ensayos de corte directo, en función de la dirección de tallado para muestras de la Unidad de Almarchal.

Como puede observarse en la Figura 5-53, las direcciones transversal y perpendicular muestran unos parámetros resistentes medios similares y superiores a los obtenidos en la dirección paralela.

Los parámetros calculados para las muestras con tallado perpendicular y transversal (en las que la rotura se produce a través de roca matriz), se encuentran en los mismos órdenes de magnitud que el ajuste calculado, según un criterio de rotura de Morh-Coulomb, para los datos obtenidos de los ensayos triaxiales y de compresión simple (véase apartado 5.2.4.3.1).

#### 5.2.4.3.2 Ensayos de campo

##### 5.2.4.3.2.1 Ensayos de resistencia al corte directo *in situ*

La resistencia de esta unidad se midió *in situ* por medio de ensayos de corte directo a gran escala (0,5x0,5x0,5 m). Estos ensayos pueden ser considerados como no drenados siendo el grado medio de saturación de los bloques de entre el 85 y el 90 %. En la Tabla 5-41 se muestran los resultados de estos ensayos:

Tabla 5-41. Ensayos de resistencia al corte directo *in situ* en la Unidad de Almarchal.

Parámetro	$C_u$ (kPa)	$\phi_u$ (°)
n	3	3
Máximo	87	15,1
Mínimo	24	3,7
$\mu$	66	9,7
$\sigma$	36,3	5,8
$\nu$	0,55	0,59
Distribución	-	-
Xk,inf	84,15	6,8
Xk,sup	47,85	12,6
Percentil 05	-	-
Percentil 95	-	-
Error mínimo	-	-

Estos datos de resistencia son bajos para el tipo de material ensayado. Esto puede explicarse por la escasa profundidad a la que se realizaron los ensayos (~ 5 m) donde el material se encontraría alterado y descomprimido. La densidad *in situ* media medida es de 1650 kg/m<sup>3</sup> quedándose muy por debajo de los valores obtenidos en muestras inalteradas (véase Tabla 5-34 y Tabla 5-35). Esto refuerza la interpretación de estos datos como propios de materiales alterados.

Estos valores se encuentran dentro del mismo orden de magnitud que los medidos en ensayos TUU (véase apartado 5.2.4.3.1) con muestras tomadas en la misma localización.

##### 5.2.4.3.2.2 Ensayos de deformabilidad

Los parámetros deformacionales *in situ* de la Unidad de Almarchal fueron medidos mediante ensayos de carga con placa, ensayos presiométricos y mediante la medida de la deformación producida por la acción de los *grippers* de la tuneladora utilizada para la excavación de la galería de Tarifa (Tabla 5-42 y Figura 5-54).

Tabla 5-42. Ensayos de deformabilidad *in situ* en la Unidad de Almarchal.

Parámetro	E <sub>PRESIOMETRO*</sub> (MPa)	E <sub>GRIPPER</sub> (MPa)	E <sub>PLACA</sub> (MPa)
n	23	7	9
Máximo	2100	121	1,07
Mínimo	77	36	0,19
$\mu$	422,9	89,00	0,51
$\sigma$	563,3	26,67	0,27
$\nu$	1,4	0,32	0,54
Distribución	LOG.NORMAL	-	-
$X_{k,inf}$	299	75,7	0,38
$X_{k,sup}$	597	102,3	0,65
Percentil 05	50	-	-
Percentil 95	1197	-	-
Error mínimo	> 25 %	-	-

(\*) los módulos representados son los correspondientes al módulo de deformación del macizo obtenido en base a los ensayos presiométricos utilizando el coeficiente de correlación  $\alpha$  de Menard (1975).

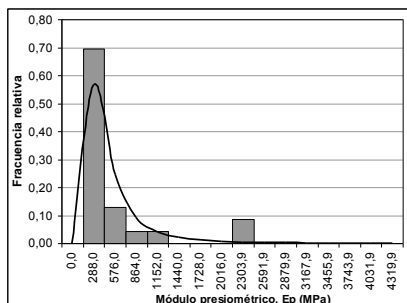


Figura 5-54. Distribución estadística del módulo presiométrico de la Unidad de Almarchal.

El módulo presiométrico es claramente mayor que el módulo obtenido con las otras dos técnicas. Esto puede explicarse por el estado del macizo rocoso en el momento de ejecución de los ensayos. Por un lado, el ensayo presiométrico se realiza en el interior de un sondeo realizado en materiales más o menos inalterados mientras que los ensayos de deformabilidad con *grippers* se han realizado en las paredes de la galería, cuyo material está plastificado tras la excavación. Los ensayos de carga con placa fueron realizados en zanjas someras donde, como se mencionó en el caso de los ensayos de corte directo *in situ*, el material presentaría alteración y fracturación por descompresión.

Un indicativo del estado del macizo es la relación entre los módulos de carga inicial y los obtenidos en un ciclo de descarga-recarga (Tabla 5-43). La primera carga de estos ensayos produce un cierre de las discontinuidades y una recompresión del material. Estas deformaciones de carácter irreversible (plástico) hacen que el módulo inicial disminuya. Por tanto, a mayor fracturación y mayor descompresión del material, menor será el módulo inicial en comparación con el de recarga que no es afectado por estos fenómenos.

Tabla 5-43. Valores medios de la relación entre módulos iniciales y de recarga en la Unidad de Almarchal.

Ensayo	Presiómetro	Grippers	Placa
Valor medio	0,73	0,17	0,51

Como puede observarse en la Tabla 5-43, los valores medios de la relación  $E_i/E_R$  para cada ensayo muestran cierta relación directa con los valores del módulo inicial. Esto parece indicar que el módulo de deformación obtenido de los ensayos presiométricos esté más cercano al que presenta el macizo rocoso no descomprimido y sano. Por tanto, podría decirse que el módulo

medio del macizo estaría entre 300 y 600 MPa para los materiales no alterados, mientras que los módulos obtenidos de los ensayos de carga con placa (380 - 650 kPa) pueden ser representativos de materiales muy someros y alterados.

Es de destacar la diferencia entre el módulo de deformación medido en laboratorio y el medido en el campo. Si bien, el módulo de deformación en campo suele ser menor que aquel obtenido en laboratorio, en este caso se observa la tendencia inversa (véanse Tabla 5-38 y Tabla 5-42). Si se considera que el módulo de laboratorio solamente incorpora el comportamiento de la roca matriz y que el módulo *in situ* incorpora además el comportamiento de las discontinuidades en ningún momento este último podría ser mayor que el primero. Este comportamiento podría explicarse por la fisuración que afecta a la roca matriz. Las fisuras, cuando el material está confinado (como el caso del campo) permanecen cerradas, y por tanto no influyen en la deformabilidad del material. El módulo de laboratorio se ha medido solamente mediante ensayos no confinados. Con esta falta de confinamiento las fisuras se abren y por tanto disminuyen el módulo de deformación del material.

#### 5.2.4.4 Hinchamiento

En las campañas de investigación se han utilizado diferentes ensayos para la determinación del hinchamiento esperable en esta unidad como el ensayo Lambe, el ensayo de hinchamiento libre o el ensayo de presión de hinchamiento (Tabla 5-44 y Figura 5-55)

Tabla 5-44. Valores de hinchamiento de la Unidad de Almarchal.

Parámetro	Índice Lambe (kPa)	Presión de hinchamiento (kPa)	Hinchamiento libre (%)
n	36	19	15
Máximo	342,00	300,00	18,00
Mínimo	39,00	7,00	0,30
$\mu$	149,11	129,89	5,29
$\sigma$	76,74	80,64	4,67
$\nu$	0,52	0,64	0,91
Distribución	LOG.NORMAL	NORMAL	GAMMA
$X_{k,inf}$	129,32	97,81	3,17
$X_{k,sup}$	171,92	161,97	7,41
Percentil 05	55,82	0,00	0,72
Percentil 95	308,10	269,73	13,34
Error mínimo	25 %	25 %	> 25 %

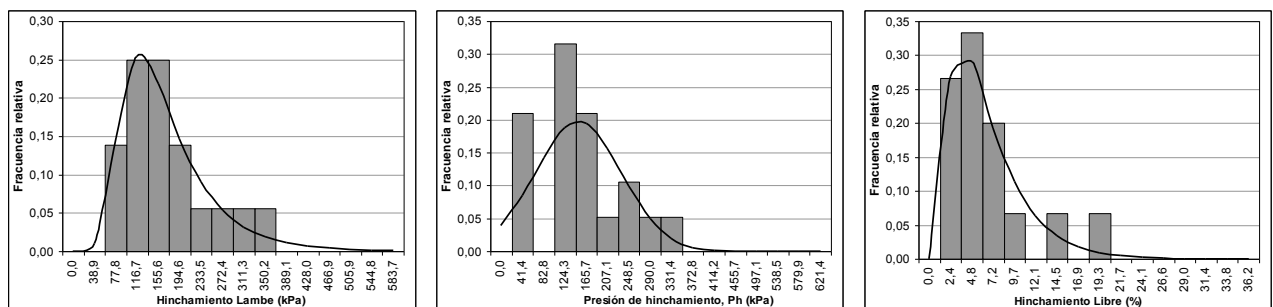


Figura 5-55. Distribución estadística de los parámetros de hinchamiento de la Unidad de Almarchal.

Los resultados de los ensayos de presión de hinchamiento (sobre muestras inalteradas) y Lambe (con muestra remoldeada) muestran mucha similitud, tanto en dispersión como en valores medios, siendo algo menor en el ensayo Lambe. En función de los datos recopilados, el



Almarchal arcilloso puede clasificarse como de expansividad media a muy alta, mientras que el Almarchal margoso se clasificaría como de expansividad baja (González de Vallejo *et al.*, 2002).

#### 5.2.4.5 Durabilidad

La durabilidad de estos materiales fue evaluada mediante ensayos de sequedad-humedad-desmoronamiento, denominados comúnmente como Se-Hu-Des o *Slake Durability Test*.

Solamente se cuenta con 4 ensayos. Los valores de  $I_D$  obtenidos varían entre 4,3 y 32 lo que clasifica a los materiales ensayados como de muy baja durabilidad (CEDEX, 1992a).

#### 5.2.4.6 Permeabilidad

La permeabilidad de esta unidad se ha medido mediante 26 ensayos Lefranc (Tabla 5-45 y Figura 5-56).

Tabla 5-45. Ensayos de permeabilidad *in situ* de la unidad de Almarchal.

Parámetro	Permeabilidad (-log(m/s))
n	26
Máximo	10,52
Mínimo	9,31
$\mu$	10,01
$\sigma$	0,31
$\nu$	0,03
Distribución	NORMAL
$X_{k,inf}$	9,90
$X_{k,sup}$	10,12
Percentil 05	9,48
Percentil 95	10,55
Error mínimo	5 %

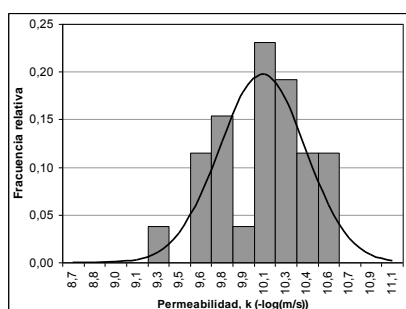


Figura 5-56. Permeabilidad de la Unidad de Almarchal

Como puede verse en la Figura 5-56, la permeabilidad media es inferior a  $10^{-10}$  m/s, lo cual indica que la unidad es prácticamente impermeable.

#### 5.2.4.7 Datos geomecánicos de la unidad

Las características geomecánicas a nivel de macizo rocoso de la Unidad de Almarchal son, en general, pobres. El grado de alteración de los materiales varía entre GM-II y GM-IV.

La unidad presenta un grado de fracturación y fisuración elevado, puesto de manifiesto en todos los sondeos revisados donde el RQD no superaba el 50 % salvo en esporádicas ocasiones, y ni

siquiera alcanzaba el 0 % durante importantes tramos de perforación. La descripción de los planos de discontinuidad es, en gran parte de las ocasiones, como lisos y brillantes asociados o no a planos de estratificación.

La roca matriz, además de la escasa resistencia que se ha mencionado anteriormente, presenta una abundante microfisuración.

Los datos de RMR recogidos en la galería de Tarifa (Geocontrol, 1998) varían entre 30 y 35 para el Almarchal arcilloso y 35 y 40 para el margoso, lo que clasificaría el macizo rocoso como de calidad geomecánica mala (Bieniawski, 1989). En los sondeos S-7 y S-9 se han calculado valores de RMR entre 12 y 20 que clasificaría al macizo como de muy mala calidad geomecánica.

### 5.2.5 Brechas

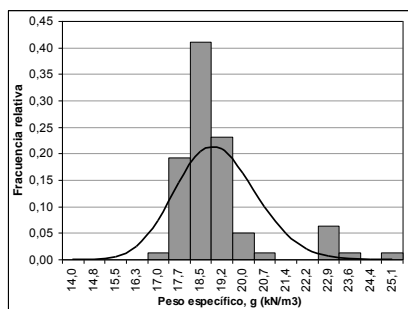
Al igual que ocurre con las arenas bioclásticas, no hay ningún ensayo de campo en esta unidad y, por tanto, los datos obtenidos deben de tomarse con mucha precaución debido al pequeño volumen de material ensayado en comparación con la estructura de estos materiales, que puede presentar grandes bloques embebidos en la matriz arcillosa.

#### 5.2.5.1 Propiedades elementales

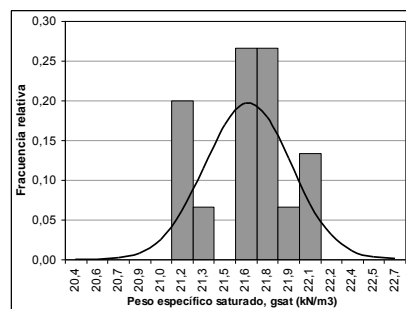
La Tabla 5-46 y la Figura 5-57 muestran un resumen de los principales parámetros elementales medidos en las muestras obtenidas de los depósitos de brechas.

Tabla 5-46. Parámetros de estado de las Brechas.

Parámetro	$\gamma_{ap} \text{ (kN/m}^3\text{)}$	$\gamma_{sat} \text{ (kN/m}^3\text{)}$	$\gamma_s \text{ (kN/m}^3\text{)}$	e
n	78	30	41	30
Máximo	24,60	22,02	28,76	0,63
Mínimo	17,00	21,04	26,78	0,45
$\mu$	18,69	21,57	27,62	0,52
$\sigma$	1,47	0,29	0,53	0,04
$\upsilon$	0,08	0,01	0,02	0,07
Distribución	LOG.NORMAL	NORMAL	LOG.NORMAL	LOG.NORMAL
$X_{k,inf}$	18,44	21,48	27,48	0,51
$X_{k,sup}$	18,95	21,66	27,76	0,53
Percentil 05	16,52	21,08	26,75	0,46
Percentil 95	21,02	22,07	28,51	0,58
Error mínimo	5 %	5 %	5%	30



Peso específico aparente



Peso específico saturado

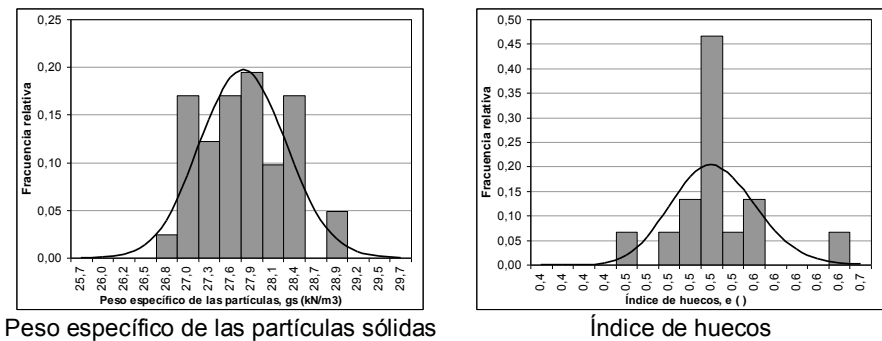


Figura 5-57. Distribuciones de las propiedades elementales de las Brechas.

La variabilidad de los datos es pequeña y coherente con los datos esperables en este tipo de materiales. Estos parámetros no muestran ninguna tendencia clara con la profundidad y pueden considerarse, a efectos de cálculo, como homogéneos para todo el depósito.

5.2.5.2 Plasticidad

La matriz arcillosa que forma gran parte de estos materiales proviene del desmantelamiento de las diferentes unidades existentes en las cercanías, es por tanto de esperar que sus propiedades sean similares (Tabla 5-47 y Figura 5-59).

Tabla 5-47. Datos de plasticidad de las Brechas.

Parámetro	Índice de plasticidad (%)
n	30
Máximo	38,57
Mínimo	15,50
$\mu$	25,74
$\sigma$	5,64
$\upsilon$	0,22
Distribución	LOG.NORMAL
$X_{k,inf}$	24,01
$X_{k,sup}$	27,60
Percentil 05	17,37
Percentil 95	36,35
Error mínimo	10 %

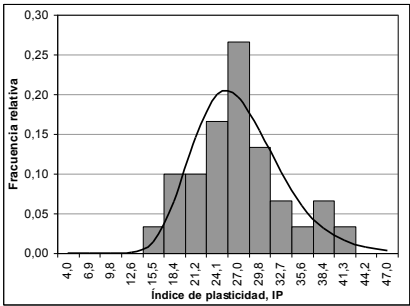


Figura 5-58. Distribución de los índices de plasticidad medidos en las Brechas.

Los valores presentan cierta variabilidad si bien la relación entre ellos es bastante constante en todos los casos. Como puede verse en la Figura 5-59, las arcillas estudiadas se pueden

clasificar como CH o CL y su disposición en el gráfico de Casagrande es paralela a la línea A y justo por encima de ella.

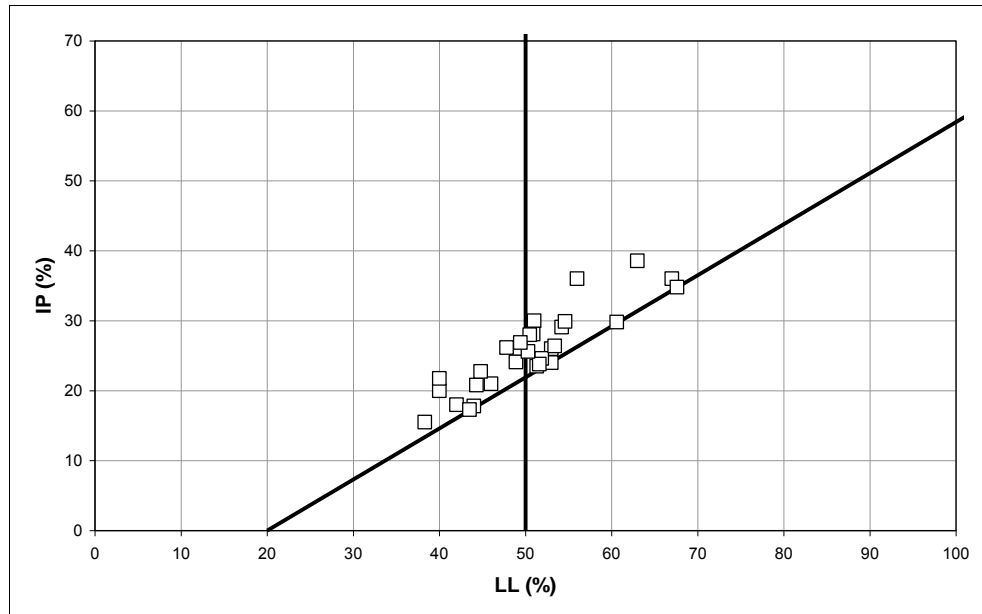


Figura 5-59. Gráfico de plasticidad de las brechas.

En el trabajo de Dong *et al.* (2013) se indica una actividad media (A) para estas arcillas de 0,77 lo que se encuentra en el límite entre arcillas inactivas y arcillas normales (González de Vallejo *et al.*, 2002).

### 5.2.5.3 Resistencia y deformabilidad

En base a ensayos de resistencia a compresión simple y a ensayos triaxiales se han obtenido los siguientes parámetros resistentes y deformacionales de las brechas (Tabla 5-48 y Figura 5-60):

Tabla 5-48. Parámetros resistentes y deformacionales de las Brechas.

Parámetro	RCS (MPa)	E (MPa)
n	15	14
Máximo	3,08	220,00
Mínimo	0,09	50,00
$\mu$	0,77	136,43
$\sigma$	0,72	59,65
$\upsilon$	0,97	0,45
Distribución	LOG.NORMAL	NORMAL
$X_{k,inf}$	0,51	108,20
$X_{k,sup}$	1,17	164,66
Percentil 05	0,12	30,78
Percentil 95	2,39	242,07
Error mínimo	> 25 %	25 %

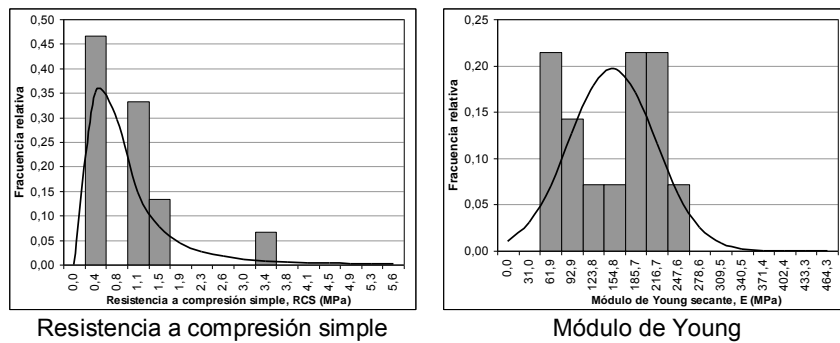


Figura 5-60. Resistencia y deformabilidad de las Brechas

Los valores de resistencia a compresión simple (RCS) son bajos, yendo de suelo rígido a roca muy blanda (ISRM, 1981). Los módulos de deformación son propios de suelos rígidos.

Los ensayos triaxiales realizados muestran una gran variabilidad tanto en cohesión efectiva ( $c'$ ) como en ángulo de rozamiento interno ( $\phi'$ ). Estos parámetros, como puede verse en la Figura 5-61, evolucionan de manera diferente en profundidad. Al aumentar esta, el material pasa de un comportamiento principalmente friccional a un comportamiento más cohesivo. Esto se debe, según Dong *et al.* (2013), a que las tensiones iniciales influye considerablemente en el comportamiento de las brechas.

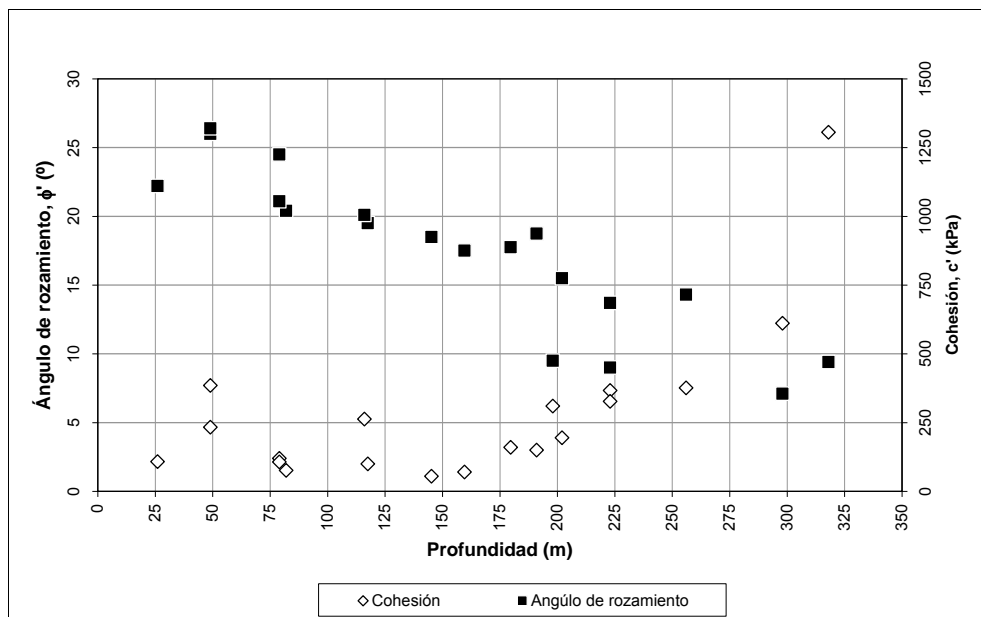


Figura 5-61. Evolución de los parámetros resistentes con la profundidad en la Brechas

No obstante, dada la variabilidad de estos materiales y que su interrelación no permite realizar un estudio estadístico de los datos, podrían indicarse, a modo de referencia, los siguientes parámetros resistentes medios:

- $c' = 300 \text{ kPa}$
- $\phi' = 18^\circ$

### 5.2.5.4 Permeabilidad

Se ha medido la permeabilidad en laboratorio sobre varias probetas (Tabla 5-49 y Figura 5-62).

Tabla 5-49. Ensayos de permeabilidad *en laboratorio* de las brechas.

Parámetro	Permeabilidad (-log(m/s))
n	55
Máximo	12,41
Mínimo	9,09
$\mu$	10,26
$\sigma$	0,74
$\nu$	0,07
Distribución	LOG.NORMAL
Xk,inf	10,10
Xk,sup	10,42
Percentil 05	9,11
Percentil 95	11,50
Error mínimo	5 %

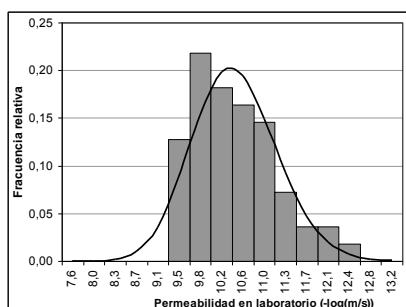


Figura 5-62. Permeabilidad de las brechas

La dispersión de los datos es pequeña, sobre todo si los analizamos en escala logarítmica. La permeabilidad media es de  $10^{-10}$  m/s lo cual clasificaría a estos materiales, en el peor de los casos, como prácticamente impermeables (Jiménez Salas y Justo Alpañes, 1971).

Dada la plasticidad de estos materiales, que permitiría el cierre de las posibles fracturas que se originaran en su seno, no se espera, a escala de macizo rocoso, una permeabilidad mayor a la medida en laboratorio en especial a elevadas profundidades como a las que discurriría el futuro túnel.

### 5.2.6 Arenas Bioclásticas

Si bien esta unidad aparece en el paleocanal sur, su espesor (unos 100 m) hace que, según el trazado de proyecto actual, no se vea afectado por la excavación del túnel, quedando unos 50 m sobre la clave del mismo. Esto hace que su escasa caracterización geotécnica no sea, a priori, de relevante importancia.

Todas las muestras ensayadas pertenecen a un solo sondeo (KF-16).

### 5.2.6.1 Propiedades elementales

La gran mayoría de los escasos datos recopilados son datos de peso específico seco, saturado o de las partículas sólidas. A continuación se analizan, en la medida de lo posible, estos datos (Tabla 5-50 y Figura 5-63).

Tabla 5-50. Peso específico de las arenas bioclásticas.

Parámetro	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ kN/m <sup>3</sup> )
n	6	11	5
Máximo	23,80	21,30	22,39
Mínimo	22,50	16,85	20,72
$\mu$	23,03	18,94	21,46
$\sigma$	0,45	1,24	0,63
$\upsilon$	0,02	0,07	0,03
Distribución	-	NORMAL	-
$X_{k,inf}$	22,81	18,26	21,15
$X_{k,sup}$	23,25	19,62	21,77
Percentil 05	-	16,69	-
Percentil 95	-	21,20	-
Error mínimo	-	5%	-

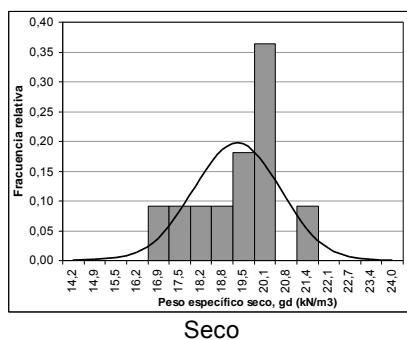


Figura 5-63. Peso específico las arenas bioclásticas.

### 5.2.6.2 Granulometría y Plasticidad

En la Tabla 5-51 se muestran los valores representativos de los ensayos granulométricos realizados:

Tabla 5-51. Granulometría de las arenas bioclásticas.

Parámetro	Pase tamiz 2 mm (%)	Pase tamiz 0,08 mm (%)
n	5	5
Máximo	84,8	14,0
Mínimo	46,1	5,7
$\mu$	65,86	7,97
$\sigma$	15,81	3,46
$\upsilon$	0,24	0,43
Distribución	-	-
$X_{k,inf}$	58,0	6,2
$X_{k,sup}$	73,8	9,7
Percentil 05	-	-
Percentil 95	-	-
Error mínimo	-	-

A la vista de esta tabla puede decirse que las muestras ensayadas presentan poco contenido en finos (< 15 %) y su fracción más importante es la de arena.

Se han realizado seis determinaciones de la plasticidad de este material, obteniéndose en todos los casos el resultado de no plástico, resultado coherente con el tipo de material arenoso del que está compuesto la unidad.

### 5.2.6.3 Resistencia y deformabilidad

Los parámetros resistentes de esta material han sido determinados a partir de ensayos triaxiales. La Tabla 5-52 muestra los parámetros de la envolvente de Mohr-Coulomb estimados:

Tabla 5-52. Parámetros resistentes según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb de las Arenas bioclásticas (CEDEX, 2005).

$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
22	41

Según el informe de los ensayos (CEDEX, 2005) la interpretación de la envolvente de Mohr-Coulomb con cohesión, para un material granular no plástico como este, se debe a la existencia de una cementación de los granos. Este fenómeno fue observado en inspección visual de las muestras y se constató con ensayos químico-mineralógicos.

### 5.2.6.4 Permeabilidad

No se cuenta con ensayos de permeabilidad *in situ*, siendo los datos obtenidos de ensayos de laboratorio los únicos datos de permeabilidad de la unidad con los que se cuenta (Tabla 5-53).

Tabla 5-53. Ensayos de permeabilidad en laboratorio de las arenas bioclásticas.

Parámetro	Permeabilidad (-log(m/s))
n	9
Máximo	9,13
Mínimo	4,96
$\mu$	7,02
$\sigma$	1,29
$\nu$	0,19
Distribución	-
$X_{k,inf}$	6,38
$X_{k,sup}$	7,66
Percentil 05	-
Percentil 95	-
Error mínimo	-

Según estos datos la permeabilidad (medida en laboratorio) variaría entre  $10^{-5}$  y  $10^{-9}$  m/s. Estos valores son bajos para un material granular.



### 5.3 Grado de caracterización de cada unidad

A continuación se recoge el análisis sobre la certidumbre de los datos obtenidos y sobre el grado de caracterización de cada unidad (véase apartado 5.1.7).

Para cada parámetro geotécnico evaluado en cada una de las unidades geotécnicas se ha evaluado el grado de certidumbre (Tabla 5-3) según los criterios recogidos en la Tabla 5-2.

#### 5.3.1 Unidad de Algeciras (Beni Ider)

En la Figura 5-64, Figura 5-65 y Figura 5-66 se recogen los criterios empleados para la determinación del grado de certidumbre de cada uno de los parámetros evaluados en los materiales de la Unidad de Algeciras.

Parámetros	ROCA MATRIZ												JUNTAS					MACIZO				
	$\gamma$	límites	RCS	RTI	IS <sub>50</sub>	Ei	$\nu$	M-C	I <sub>b2</sub>	Hch.	P. hin.	k	c <sub>p</sub>	$\phi_p$	c <sub>r</sub>	$\phi_r$	JRC	$\rho$	$\omega$	E <sub>c</sub>	H&B	k
número de datos	2	0	2	0	2	2	2	-2	2	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-2	2	2	0	-2	0
variabilidad o bondad del ajuste	0	0	-1	-1	0	-2	-2	-2	0	-2	-2	-2	0	0	0	0	0	2	2	2	-2	-1
número de proyectos	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1
número de localizaciones	2	2	2	2	2	2	-2	0	2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	2	0	2
Descripción de los ensayos	1	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
descripción de las muestras	0	0	1	1	0	1	1	0	1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
Tóma de muestras	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>SUMA</b>	6	1	5	3	5	5	0	-3	6	-8	-8	-8	-5	-5	-5	-5	-5	3	3	6	-3	-1

Figura 5-64. Grado de certidumbre de los parámetros de los materiales arcillosos de la Unidad de Algeciras.

Parámetros	ROCA MATRIZ							JUNTAS					Maz
	γ	RCS	RTI	IS <sub>50</sub>	Ei	ν	I <sub>b2</sub>	C <sub>p</sub>	Φ <sub>p</sub>	Hch.	P. hin.	JRC	k
número de datos	2	1	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2	-2	0
variabilidad o bondad del ajuste	2	-1	-1	1	0	-1	2	-2	-2	-2	-2	-2	-1
número de proyectos	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
número de localizaciones	2	2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	2
Descripción de los ensayos	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
descripción de las muestras	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1
Tóma de muestras	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SUMA	7	3	-4	0	-3	-4	1	-7	-7	-7	-7	-7	-1

Figura 5-65. Grado de certidumbre de los parámetros de los materiales detríticos de la Unidad de Algeciras.

Parámetros	Roca matriz						Macizo	
	$\gamma$	RCS	RTI	IS <sub>50</sub>	E <sub>i</sub>	$\nu$	E <sub>c</sub>	k
número de datos	2	0	0	-2	0	0	0	0
variabilidad o bondad del ajuste	2	0	0	0	-2	0	2	-1
número de proyectos	1	1	1	1	1	1	0	-1
número de localizaciones	2	0	2	0	-2	-2	-2	2
Descripción de los ensayos	0	0	0	0	1	0	1	0
descripción de las muestras	0	1	1	0	1	0	0	-1
Tóma de muestras	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>SUMA</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>1</b>	<b>-1</b>

Figura 5-66. Grado de certidumbre de los parámetros de los materiales calcáreos de la Unidad de Algeciras.

Esta es una de las unidades mejor estudiadas en todo el proyecto. Además de contar con dos obras singulares en su estudio (complejo de pozos y galerías de Malabata, y galería experimental de Tarifa) existe un importante número de ensayos.

El parámetro mejor definido es el peso específico, ya que se cuenta con un elevado número de datos y su variabilidad, en todos los materiales, es pequeña.

Las características resistentes y deformacionales principales (RCS, RTI, E<sub>i</sub> y  $\nu$ ) cuentan con una caracterización buena en el caso de los materiales arcillosos. La RCS tiene una certidumbre buena en los materiales detríticos y media en los calcáreos. Otros parámetros como RTI, E<sub>i</sub> y  $\nu$  deben de ser estudiados más a fondo.

Los criterios de rotura de la roca matriz, tanto si se toma un criterio Mohr-Coulomb como un criterio Hoek-Brown, no cuentan con un número suficiente de ensayos como para ser definidos con fiabilidad. Los parámetros resistentes a escala de macizo rocoso, como suele ser habitual en la gran mayoría de los proyectos, son escasos. A pesar de ello se cuenta con valores de E<sub>c</sub> bastante fiables en el caso de los tramos arcillosos.

Los valores correspondientes a la expansividad del material son escasos y muestran una importante dispersión. No obstante, indican claramente un potencial expansivo de los materiales arcillosos que ha de ser tenido en cuenta.

Los datos de permeabilidad son escasos, tanto a nivel de roca matriz como de macizo rocoso y en estos últimos no se distingue entre las litologías, que presumiblemente presentan importantes diferencias sobre todo en zonas fisuradas.

La mayor deficiencia en la caracterización se encuentra en la resistencia y deformabilidad de las discontinuidades que cuentan con un número muy escaso de ensayos.

### 5.3.2 Unidad de Bolonia (Tala Lakrah)

En la Figura 5-67, Figura 5-68 y Figura 5-69 se recogen los criterios empleados para la determinación del grado de certidumbre de cada uno de los parámetros evaluados en los materiales de la Unidad de Bolonia.

Parámetros	Roca matriz					MACIZO			
	$\gamma_d$	Limites	RCS	IS <sub>50</sub>	I <sub>b2</sub>	$\rho$	E <sub>c</sub>	M-C	k
número de datos	-2	0	-2	-1	-1	-2	-2	-2	-2
variabilidad / ajuste	0	-1	0	-2	-2	0	-2	0	-2
número de emplazamientos	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	0
número de proyectos	0	2	0	2	0	-2	-2	-2	0
Información sobre el ensayo	0	0	0	0	0	0	1	1	-1
Información sobre las muestras	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Sesgo	0	0	-1	0	0	-1	-1	-1	0
<b>SUMA</b>	-2	2	-3	-2	-4	-6	-6	-4	-5

Figura 5-67. Grado de certidumbre de los parámetros de los materiales arcillosos de la Unidad de Bolonia.

Parámetros	Roca matriz				Macizo		
	$\gamma_d$	Limites	RCS	IS <sub>50</sub>	$\rho$	E <sub>c</sub>	M-C
variabilidad / ajuste	-2	-2	-1	0	-2	-2	-2
número de datos	1	-1	-1	-1	0	-1	0
número de emplazamientos	-1	0	0	-1	-1	-1	-1
número de proyectos	-2	0	0	0	-2	-2	-2
Información sobre el ensayo	0	0	0	0	0	1	1
Información sobre las muestras	0	0	0	0	0	1	1
Sesgo	0	0	-1	0	1	-1	-1
<b>SUMA</b>	-4	-3	-3	-2	-4	-5	-4

Figura 5-68. Grado de certidumbre de los parámetros de los materiales detríticos de la Unidad de Bolonia.

Parámetros	IS <sub>50</sub>
variabilidad / ajuste	-1
número de datos	-2
número de emplazamientos	-1
número de proyectos	2
Información sobre el ensayo	0
Información sobre las muestras	0
Sesgo	0
<b>SUMA</b>	-2

Figura 5-69. Grado de certidumbre de los parámetros de los materiales calcáreos de la Unidad de Bolonia.

Al igual que ocurre con la Unidad de Algeciras, la presencia de materiales de diferente naturaleza dificulta en gran medida la caracterización de esta unidad.

Dentro de esta unidad los materiales peor caracterizados son las calcarenitas que apenas cuentan con unos pocos datos provenientes de ensayos de carga puntual.

En cuanto a las propiedades elementales el conocimiento es muy escaso, con datos de pesos específicos secos que no se relacionan fácilmente con las condiciones de humedad que presentan estos materiales en el campo. Los datos de plasticidad estudiados son bastante coherentes con los de las otras unidades.

Los valores de resistencia a compresión simple presentan una certidumbre mala, siendo el número de datos pequeño en comparación con la variabilidad de los datos. Los datos que aportan los ensayos de carga puntual son más numerosos, si bien la correlación entre ambos ensayos es mala y de difícil aplicación práctica.

El hinchamiento de los materiales se ha medido en muestras remoldeadas mediante ensayos Lambe. Solamente se cuenta con cuatro ensayos realizados en las limolitas, si bien no parece ser un parámetro tan importante en estos materiales como sí lo es en las argilitas.

Las propiedades resistentes y deformacionales a escala de macizo rocoso son muy reducidos y se obtuvieron mediante ensayos realizados en materiales muy someros. Esto hace que no sean representativos del comportamiento de la unidad y deben de utilizarse solamente en casos someros o en caso de materiales alterados.

En cuanto a la permeabilidad de la unidad, solamente se cuenta con tres ensayos Lugeon. Esto hace que los datos no sean suficientes para sacar ninguna conclusión sobre este parámetro.

### 5.3.3 Unidad de Facinas (Mellousa)

En la Figura 5-70 se recogen los criterios empleados para la determinación del grado de certidumbre de los parámetros de la Unidad e Facinas.

Parámetros	Roca matriz					E <sub>c</sub>
	$\gamma_d$	Limites	M-C	c <sub>u</sub>	P. de hinch.	
variabilidad / ajuste	0	1	-2	-2	-2	0
número de datos	2	1	-2	-2	-2	0
número de emplazamientos	2	2	2	2	-2	2
número de proyectos	1	1	1	1	-1	-1
Información sobre el ensayo	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Información sobre las muestras	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Sesgo	0	0	0	0	0	0
<b>SUMA</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>-3</b>	<b>-3</b>	<b>-9</b>	<b>-1</b>

Figura 5-70. Grado de certidumbre de los parámetros de la Unidad de Facinas.

Esta unidad está poco estudiada en comparación con otras, siendo los parámetros elementales (peso específico y plasticidad) los únicos que cuenta con una certidumbre buena.

Los parámetros resistentes de la roca matriz cuentan con escasa certidumbre, siendo peor aún la caracterización del potencial de hinchamiento de los materiales.

A escala de macizo rocoso se cuenta con un número alto de ensayos presiométricos habiendo sido muchos de ellos recopilados de trabajos muy antiguos, lo cual resta certidumbre a los datos aportados.

### 5.3.4 Unidad de Almarchal (Tanger)

En la Figura 5-71 se recogen los criterios empleados para la determinación del grado de certidumbre de los parámetros de esta unidad.

Parámetros	Roca matriz													Macizo Rocoso					
	$\gamma$	$\gamma_d$	$\gamma_s$	$\gamma_{sat}$	e	Limites	RCS	IS <sub>50</sub>	Ei	M-C	I <sub>D2</sub>	Hinch. libre	P. de hinch.	$\rho$	E <sub>c</sub>	M-C	H&B	c <sub>u</sub>	k
variabilidad / ajuste	2	2	2	2	1	1	-1	-1	-1	-2	-2	-1	0	2	0	-2	-2	0	2
número de datos	2	2	2	2	0	2	-2	-2	-2	-2	-1	-1	0	0	0	-2	-2	-2	2
número de emplazamientos	0	0	0	0	-1	1	-1	0	-1	1	-1	0	0	0	1	1	1	-1	-1
número de proyectos	-1	-1	-1	-1	-1	2	-2	2	-2	1	-2	2	2	1	2	1	1	2	2
Información sobre el ensayo	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	-1	0	0	1	1	0	0	1	0
Información sobre las muestras	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	-1
Sesgo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1	0
SUMA	3	3	3	3	-1	6	-4	-1	-4	-2	-7	0	2	4	5	-2	-2	0	4

Figura 5-71. Grado de certidumbre de los parámetros de la Unidad de Almarchal.

A la vista de la Figura 5-71 puede decirse que esta es una de las unidades más extensamente ensaya y caracterizada, contándose con parámetros de buena calidad en cuanto a pesos específicos y plasticidad.

Los parámetros resistentes y deformacionales a escala de laboratorio, cuentan con una certidumbre media. A escala de macizo rocoso, es buena la caracterización de su deformabilidad y permeabilidad.

Existen evidencias de expansividad en esta unidad aunque la certidumbre de estos parámetros no es muy alta.

### 5.3.5 Brechas

En la Figura 5-72 se recogen los criterios empleados para la determinación del grado de certidumbre de las brechas pliocuaternarias.

Parámetros	Roca matriz								
	$\gamma$	$\gamma_s$	$\gamma_{sat}$	e	Limites	RCS	Ei	M-C	k
variabilidad / ajuste	2	2	2	2	1	-1	0	0	2
número de datos	0	2	2	0	0	-2	0	-1	2
número de emplazamientos	2	2	2	2	2	2	2	2	2
número de proyectos	1	1	0	-1	1	0	-1	1	1
Información sobre el ensayo	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Información sobre las muestras	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sesgo	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SUMA	6	8	7	4	5	1	3	4	9

Figura 5-72. Grado de certidumbre de los parámetros de las brechas.

Esta unidad, que es una de las que peores propiedades geotécnicas presenta dentro del conjunto de los materiales estudiados, cuenta con pocos parámetros caracterizados.

Los ensayos con los que se cuenta son de buena calidad y centrados en propiedades concretas, estando bien caracterizados los pesos específicos y la plasticidad así como la resistencia, deformabilidad y permeabilidad a escala de laboratorio.

No se cuenta con ningún ensayo de campo en esta unidad debido a su localización exclusiva en el centro del Estrecho de Gibraltar.

No se esperan importantes divergencias entre los ensayos de campo y laboratorio en cuanto a la permeabilidad si bien los parámetros resistentes a escala de macizo rocoso son más difíciles de estimar a partir de ensayos de laboratorio. Esto se debe a su estructura compuesta por grandes bloques métricos embebidos en una matriz arcillosa.

### 5.3.6 Arenas bioclásticas

En la Figura 5-73 se recogen los criterios empelados para la determinación del grado de certidumbre de los parámetros geotécnicos de las arenas bioclásticas.

Parámetros	Laboratorio					
	$\gamma_d$	$\gamma_s$	$\gamma_{sat}$	Límites	M-C	k
variabilidad / ajuste	0	2	2	2	2	-2
número de datos	2	-2	-2	-2	-2	-2
número de emplazamientos	-2	-2	-2	-2	-2	-2
número de proyectos	0	0	0	0	-1	0
Información sobre el ensayo	1	1	1	1	1	1
Información sobre las muestras	1	1	1	1	1	1
Sesgo	0	0	0	0	0	0
<b>SUMA</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>	<b>-4</b>


Figura 5-73. Grado de certidumbre de los parámetros de las arenas bioclásticas


Estos materiales han sido escasamente estudiados y el número de ensayos realizados es muy pequeño. Los parámetros conocidos se limitan a pesos específicos, plasticidad y en menor medida resistencia y permeabilidad. No obstante, debido a que el trazado del túnel no afectará a estos materiales, al menos en la configuración actual del proyecto, esta escasa caracterización no parece tener demasiada importancia.


### 5.3.7 Grado de caracterización global


En la Figura 5-74 se recoge un resumen de este análisis.


UNIDAD	LITOLOGIA	ROCA MATRIZ												JUNTAS						MACIZO												
		$\gamma$	$\gamma_{sat}$	e	Límites	RCS	RTI	IS50	EI	v	M-C	$C_u$	$I_{Dz}$	Hinch. libre	P. de hinch.	k	$C_p$	$\phi_p$	$C_r$	$\phi_r$	$k_n$	$k_s$	JRC	p	$\omega$	$F_c$	M-C	H&B	$C_u$	k		
Algeciras	Arcilloso	6			1	5	3	5	5	0	-3		6	-8	-4		-5	-5	-5	-5					3	3	6			-3		-1
	Detrítico	7				3	-4	0	-3	-4		1					-7	-7	-7	-7											-1	
	Calcareo	7				2	4	-1	-1	-1														1							-1	
Almarchal	Global	3	3	-1	6	-4		-1	-4		-2	0	-7	0	2	0								4	5	-2	-2	4	0	4	-5	
Bolonia	Argilita				2	-3		-6					-4											-6	-6	-4	-4					
	Limolita				-3	-3		-2																-4	-5	-4	-4					
	Calcarenita							-2																								
Facinas	Global				3						-3	-3			-9											-1						
Arenas	Global		0		0						-1					-4																
Brechas	Global	6	7	4	5	1			3		4					9																


 Certidumbre muy buena

 Certidumbre media

 Certidumbre muy mala

 Sin ninguna caracterización

 Certidumbre buena

 Certidumbre mala

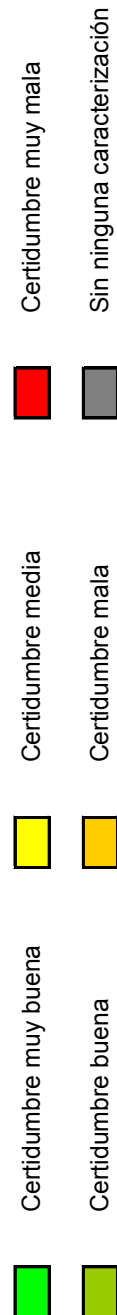


Figura 5-74. Grado de certidumbre de cada uno de los parámetros evaluados en las diferentes unidades.

## 5.4 Resumen y conclusiones de la caracterización geotécnica de las unidades

Uno de los puntos que define este proyecto es la gran variabilidad de las unidades. Esto, unido a la dificultad de acceso a gran parte de los materiales, hace de la caracterización un problema difícil de resolver.

Las Unidades de Almarchal y de Algeciras son las que cuentan con un mayor número de datos, haciendo que los parámetros calculados para ellas sean los que cuenten con mayor certidumbre.

La unidad de Algeciras se ha dividido en tres materiales: arcillosos, detríticos y calcáreos (Figura 5-75 y Figura 5-76). Estos materiales presentan generalmente una anisotropía a escala de macizo rocoso debido a los planos de estratificación. De manera general pueden destacarse valores de RCS medios de entre 20 y 45 MPa, RTI de entre 2,5 y 5 MPa y módulos de deformación medios de la roca matriz de entre 4 y 18 GPa. Los módulos de deformación a escala de macizo rocoso son más bajos, en el orden de 1 GPa.

En cuanto a la Unidad de Almarchal la resistencia a compresión simple es más baja, con valores medios por debajo de 1 MPa y módulos de deformación de en torno a 20 MPa (Figura 5-75 y Figura 5-76). En esta unidad se han medido expansividades altas. Estos materiales presentan anisotropía del mismo modo que la unidad de Algeciras.

Los materiales de la Unidad de Bolonia presentan unas resistencias del mismo orden que las de la unidad de Algeciras si bien algo más altas, con valores medios de la RCS de entre 45 y 70 MPa (Figura 5-75). En esta unidad se han medido, al igual que en otras unidades, valores altos de expansividad.

La unidad de Facinas presenta unas propiedades deformacionales más bajas que las unidades de Bolonia o Algeciras con módulos de deformación del macizo de unos 100 MPa en material sano (Figura 5-32). También en esta unidad se han medido expansividades altas.

En cuanto a los materiales que rellenan los paleocanales, las brechas cuentan con un número de datos reducido si bien estos ensayos han sido suficientemente meticulosos y con unos objetivos bien definidos como para poder aportar datos de buena calidad. La definición de parámetros a escala de macizo rocoso es muy difícil dada la estructura de estos y esto hace que los ensayos de campo sean indispensables. Las arenas bioclásticas son las peor caracterizadas con un escaso número de datos si bien su afección al proyecto de túnel bajo el Estrecho es muy pequeña.

La Unidad de Almarchal y las brechas son los materiales, de entre los que se cuenta con datos, que peores características geotécnicas presentan (Figura 5-75 y Figura 5-76). Sus resistencias y módulos de deformación son claramente inferiores a los del resto de materiales.

La Unidad de Bolonia, que desde el punto de vista geológico es muy similar a la Unidad de Algeciras, presenta valores de la resistencia a compresión simple claramente superiores a esta (Figura 5-75). La certidumbre de este parámetro es baja y presenta una elevada dispersión no pudiendo descartarse que los parámetros representativos de ambas unidades sean más semejantes que los que muestran los datos con los que se cuenta.

En general se ha observado que, para un mismo parámetro, la función de distribución que mejor se ajusta a la población varía entre unas unidades y otras. Este fenómeno no se ha podido estudiar en profundidad pero puede deberse, por un lado, al diferente comportamiento geotécnico y, por otro lado, al pequeño tamaño que presenta alguna población.



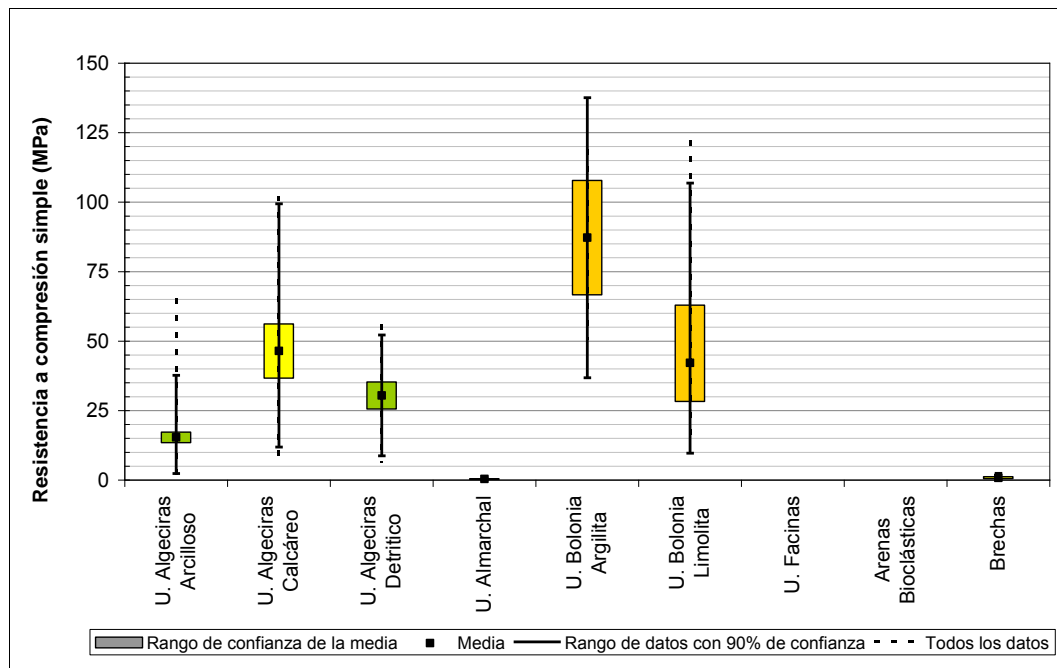


Figura 5-75. Resistencia a compresión simple de los diferentes materiales analizados

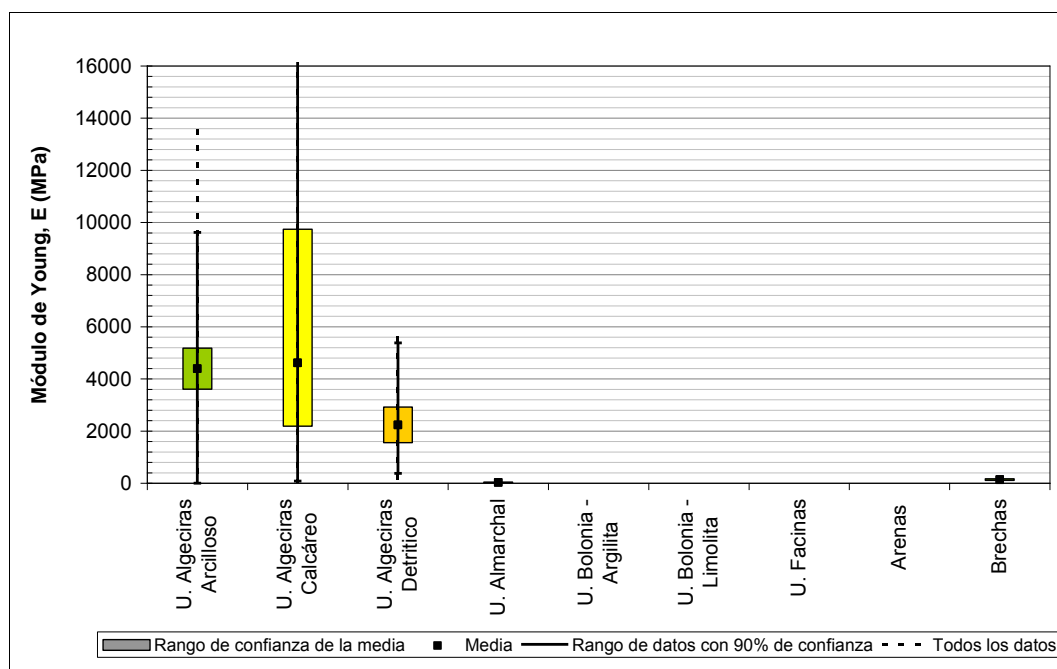


Figura 5-76. Módulo de deformación de los diferentes materiales analizados

En cuanto a la permeabilidad, todos los materiales, a excepción de las arenas bioclásticas, presentan valores muy bajos.

La recopilación de datos geomecánicos como RMR o Q es escasa. No existe una toma sistemática de grados de fracturación, grados de alteración o estado general de los macizos rocosos. La determinación de la calidad geomecánica de las diferentes zonas a atravesar por el proyecto es clave para la interpretación de los datos recopilados, así como para poder predecir el comportamiento de los diferentes materiales.

De manera general no se han tenido en cuenta las propiedades de las discontinuidades. En el caso de las unidades flyschoides, donde la presencia de planos de estratificación paralelos determina en gran medida el comportamiento de los macizos rocosos, la caracterización de estos planos es determinante a la hora de estimar las propiedades globales de los mismos.

Otro parámetro de gran importancia que no se ha tenido en cuenta hasta ahora es el de las tensiones *in situ* (véase apartado 6.3.1.6). El nivel de tensiones *in situ* es clave en el comportamiento geomecánico de una excavación, más si, como es el caso, esta se localiza a grandes profundidades.

La gran variabilidad de los materiales dificulta la utilización de algunos tipos de ensayo. Los ensayos de carga puntual no parecen correlacionar de manera adecuada con los de resistencia a compresión simple en la gran mayoría de los casos, siendo su utilización poco recomendable.



## **CAPÍTULO 6**

# **MODELIZACIÓN DEL ENSAYO PRESIOMÉTRICO EN MEDIOS ANISÓTROPOS**



## 6.

# MODELIZACIÓN DEL ENSAYO PRESIOMÉTRICO EN MEDIOS ANISÓTROPOS

---

Uno de los parámetros geotécnicos más importantes a la hora de abordar un proyecto geotécnico, y especialmente en el proyecto de un túnel, es el módulo de deformación del macizo rocoso. La determinación de este módulo constituye un problema teórico y práctico no resuelto aun totalmente (Romana, 2002; Serrano *et al.*, 2002).

Los ensayos de campo disponibles para estimar el módulo de deformación son, en la actualidad, caros y presentan en muchos casos una gran dificultad de emplazamiento en zonas de complicado acceso.

Como se ha visto en los capítulos 3, 4 y 5, en el proyecto del túnel bajo el estrecho de Gibraltar este problema se ha abordado, principalmente, mediante la realización de ensayos de carga con placa y presiométricos.

Dadas las especiales dificultades que afectan a este proyecto en cuanto a su emplazamiento submarino y a las considerables profundidades que presenta bajo el fondo marino, los ensayos a realizar en el interior de sondeos son los más idóneos para la caracterización deformacional de los diferentes materiales, en las condiciones de alteración y de tensiones *in situ*, previamente a la excavación de cualquier túnel. Por tanto, dentro de las técnicas existentes, el ensayo presiométrico parece el más adecuado para este proyecto.

El ensayo presiométrico basa su interpretación en la expansión de una cavidad cilíndrica continua e isótropa. Sin embargo, los materiales que forman gran parte de las unidades afectadas por el proyecto muestran cierto grado de anisotropía y un importante control estructural de los planos de sedimentación, paralelos entre sí, que le confieren un comportamiento alejado del continuo. Esto hace que la interpretación habitual del ensayo presiométrico deba ser cuestionada y evaluada y, de no ser válida, deba de proponerse otra metodología de interpretación a este tipo de ensayos a fin de poder caracterizar la deformabilidad de los materiales en sus localizaciones bajo el estrecho de Gibraltar. La interpretación de los ensayos presiométricos puede ser también compleja en el caso de las brechas debido a su estructura caótica y el tamaño de sus bloques, aun cuando no presenta anisotropía.

## 6.1 Marco teórico

### 6.1.1 El ensayo presio-dilatométrico

El ensayo presio-dilatométrico es esencialmente un ensayo de carga *in situ* realizado con la ayuda de una sonda presiométrica cilíndrica recubierta de una membrana flexible y que se efectúa en el seno del terreno gracias a la realización de una perforación previa.

La metodología de ensayo consiste en la aplicación de una presión radial en el interior de un sondeo y la medida del desplazamiento que se induce en el terreno. La presión se aplica, a través de la membrana flexible, por medio de un fluido. El ensayo está concebido de modo que no cambia la longitud de la sonda.

El resultado del ensayo es una curva que se denomina “curva presiométrica” en la que se representa, para cada incremento de presión aplicada, el desplazamiento inducido en el terreno. Durante el proceso de carga se puede realizar ciclos de descarga-recarga. En el caso más general se puede obtener una gráfica como la que se muestra en la Figura 6-1.

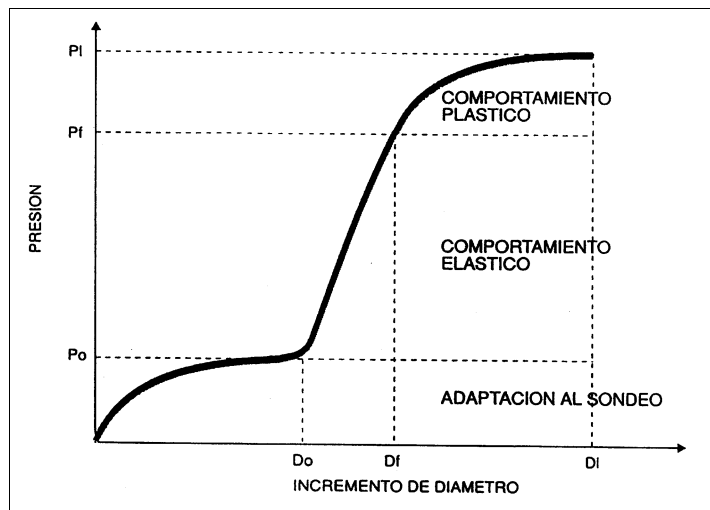


Figura 6-1. Curva presiométrica típica

En ella se pueden distinguir las siguientes etapas de deformación:

- Adaptación de la membrana a las paredes del sondeo.
- Deformación “pseudo elástica”.
- Deformación elasto-plástica.

La tensión  $P_0$  es aquella en la cual termina la adaptación de la membrana al sondeo y comienza la deformación elástica del material.

La tensión a partir de la cual se pierde la linealidad en la curva presiométrica y en la que el terreno comienza a plastificar se denomina presión de fluencia ( $P_f$ ). En suelos, este punto corresponde con la presión a partir de la que se formará un anillo de terreno plastificado alrededor del sondeo que progresará radialmente hacia el exterior a medida que aumente la presión aplicada por la sonda. En rocas, esta pérdida de la linealidad de la curva presiométrica se corresponderá, en la mayoría de los casos, con la creación de fracturas radiales tras

superarse la resistencia a la tracción del material. Se denomina presión límite,  $P_L$ , a la tensión a partir de la cual el terreno ha sufrido una plastificación completa.

#### 6.1.1.1 Obtención del módulo de deformación del terreno

La interpretación habitual de los ensayos presiométricos supone un terreno homogéneo e isótropo, pudiéndose por tanto suponer una simetría radial.

Los esfuerzos inducidos por la sonda producen tensiones cortantes al terreno, por lo que, del análisis de la curva presiométrica según la teoría de expansión de una cavidad cilíndrica en un medio elástico, puede obtenerse de manera directa el módulo de deformación tangencial  $G_p$ , que se corresponde con la mitad de la pendiente del tramo lineal de la curva. Su cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$G_p = \frac{1}{2} R_m \frac{\Delta P}{\Delta R} \quad (6-1)$$

siendo:

- $G_p$  = Módulo de corte presiométrico;
- $\Delta P$  = Incremento de presión considerado;
- $\Delta R$  = Variación de radio correspondiente;
- $R_m$  = Radio medio del tramo lineal considerado.

Según la teoría de la elasticidad, el módulo de deformación presiométrico,  $E_p$ , se obtiene a partir del módulo de deformación tangencial,  $G_p$ , aplicando la siguiente expresión:

$$E_p = 2 \cdot G_p (1 + \nu) \quad (6-2)$$

siendo:

- $E_p$  = Módulo de deformación presiométrico;
- $G_p$  = Módulo de deformación tangencial;
- $\nu$  = Coeficiente de Poisson.

A partir del análisis de la curva presiométrica pueden estimarse otros parámetros geotécnicos propios de este ensayo como la presión límite ( $P_L$ ), la presión de fluencia ( $P_F$ ), la presión de empuje al reposo ( $P_0$ ) y la resistencia al corte sin drenaje ( $C_u$ ). Si bien, la medida de estos dos últimos parámetros no es del todo fiable para macizos rocosos, sí pueden ser tomados como valores aproximativos de referencia.

Para la obtención del módulo de deformación del macizo rocoso ( $E_c$ ) a partir del módulo presiométrico, Ménard (1975) propone la siguiente relación empírica:

$$E_c = \frac{E_p}{\alpha} \quad (6-3)$$

donde  $\alpha$  es un factor de corrección que tiene en cuenta la influencia de la trayectoria de tensiones y los problemas de microdeformaciones. Los valores de  $\alpha$  que propone están en función del tipo de terreno. En la Tabla 4-4 se muestran los valores propuestos por Ménard (1975), a partir de observaciones empíricas, para macizos rocosos.



Tabla 6-1. Valores del coeficiente  $\alpha$ . Según Ménard (1975).

Rocas	Muy fracturadas	Sanas	Muy poco fracturadas o alteradas
$\alpha$	1/3	1/2	2/3

### 6.1.1.2 Tipos de sondas

Actualmente existen tres tipos principales de sondas atendiendo al método empleado para la introducción de estas en el terreno:

- Equipos autoperforadores o SBP (*Self-boring pressuremeter*): Estos equipos cuentan con un sistema de perforación similar a las baterías empleadas para la ejecución de sondeos que les permite introducirse en el interior del terreno sin producir una alteración del estado tensional y produciendo una alteración mínima del material.
- Equipos preperforados o PBP (*Pre-boring pressuremeter*): Estas sondas se introducen en el interior de sondeos previamente ejecutados permitiendo la realización de ensayos a cualquier profundidad y en cualquier material, siempre y cuando las paredes de la perforación tengan estabilidad.
- Equipos de hincado o PIP (*Pushed-in pressuremeter*): Estos equipos, diseñados para el estudio de suelos blandos, se introducen en el terreno mediante hincado “estático” a velocidad constante de manera similar a como se emplean los equipos de piezocono.

De estos equipos, solamente los PBP son, hoy día, válidos para la realización de ensayos en rocas, sobre todo en rocas medias y duras.

Las diferentes sondas, independientemente de la clasificación anterior, emplean diversos sistemas para la medida de las deformaciones radiales que inducen en el terreno. De manera general existen dos sistemas principales:

- Equipos volumétricos: Miden la deformación en función de la variación del volumen interno de la propia sonda.
- Equipos de medidas radiales: Miden la deformación mediante uno o varios comparadores electromecánicos colocados radialmente en el interior de la sonda. Estos comparadores pueden estar colocados a una o varias alturas y el número de medidas radiales varía de unos a otros equipos.

En el caso de macizos rocosos, donde pueden existir importantes anisotropías, parece desaconsejable el empleo de equipos de medida volumétrica ya que estos suponen una deformación homogénea e isotrópica del material. Del mismo modo, aquellos equipos de medida radial en los que no exista más de una dirección de medida (ya sea una medida radial o dos medidas radiales opuestas) pueden llevar a estimaciones del módulo de deformación alejadas de la realidad. En materiales rocosos es habitual el uso de equipos denominados dilatómetros que suelen contar con varios puntos de medida radial (al menos 4 o 6) situados en hasta tres alturas diferentes. En la Figura 6-2 pueden observarse los seis dispositivos de medida de deformaciones en un equipo dilatométrico al que se ha retirado la membrana.



Figura 6-2. Detalle de los medidores de deformación radial en un equipo presio-dilatómetro Igeotest PRD.

Durante el hinchado de la membrana, el eje central de la sonda (en el que se encuentran los sensores de deformación) puede no permanecer centrado con el eje del sondeo. Este desplazamiento influye en las medidas de deformación radial, falseándolas. Para evitar esta estimación errónea de las deformaciones debe evitarse la utilización de medidas radiales de manera aislada, siendo preferible el empleo de la deformación diametral medida a través de dos sensores radiales enfrentados.

### 6.1.2 Rigidez de las discontinuidades

La rigidez normal de las discontinuidades ( $k_n$ ) es la relación entre la tensión normal efectiva que se aplica a una discontinuidad y la deformación de cierre experimentada por ésta.

La rigidez tangencial de la discontinuidad ( $k_s$ ) se refiere a la tensión tangencial necesaria para producir un desplazamiento tangencial determinado en una discontinuidad. Barton (1972) define este parámetro, para un ensayo de resistencia al corte directo en junta, como la relación entre el esfuerzo tangencial y el desplazamiento tangencial relativo de los dos bloques (Figura 6-3).

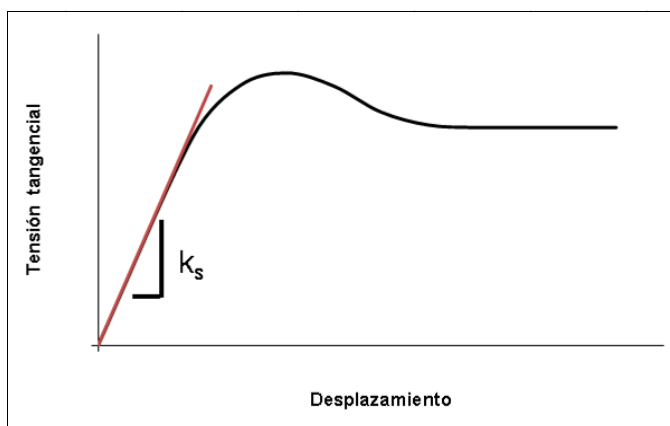


Figura 6-3. Curva tensión tangencial-desplazamiento en un ensayo de resistencia al corte directo en junta.

En discontinuidades con relleno, la rigidez de las discontinuidades depende de la rigidez del relleno y del espesor del mismo, según las siguientes expresiones:

$$k_n = E_0/h \quad (6-4)$$

$$k_s = G_0/h \quad (6-5)$$

siendo:

$E_0$  el módulo de Young del relleno

$G_0$  el módulo de corte del relleno

$h$  el espesor del relleno o la apertura de las discontinuidades

### 6.1.3 Modelos elásticos teóricos

La deformabilidad (en régimen elástico) depende de dos factores: el estado tensional al que está sometido el material y su rigidez intrínseca. Expresado en forma tensorial:

$$\mathcal{E}_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{ij} \quad (6-6)$$

siendo:

$\varepsilon_{ij}$  el tensor de deformaciones,

$S_{ijkl}$  el tensor de flexibilidad elástica,

$\sigma_{ij}$  el tensor de tensiones.

Para la determinación de la deformabilidad de un medio rocoso es necesario obtener la matriz de rigidez (S). Para la obtención de los 21 componentes de la matriz es necesaria la asunción de algún modelo de comportamiento en función de las características geológico-geotécnicas del macizo rocoso estudiado. Los modelos elásticos más habituales son los siguientes:

#### 6.1.3.1 *Elasticidad lineal isótropa*

En este modelo, el más simple de cuantos se utilizan, la deformabilidad elástica es idéntica en cualquier dirección que se evalúe. Esto hace, por simplificación, que el número de parámetros a evaluar quede reducido a dos: el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

Es también posible expresar la elasticidad mediante otros pares de parámetros: módulo de rigidez transversal (G) y módulo de compresibilidad (K); o módulo de rigidez transversal (G) y parámetro de Lamé ( $\lambda$ ). Estos parámetros pueden obtenerse mediante las siguientes expresiones:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6-7)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (6-8)$$

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (6-9)$$

La matriz de flexibilidad (S) será para este caso:

$$S = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ \text{simétrica} & & & & \frac{1}{G} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \quad (6-10)$$

### 6.1.3.2 Anisotropía transversal

En este modelo existen dos módulos elásticos diferentes en función de la dirección que se evalúe correspondiéndose una de estas direcciones principales con un eje de simetría y siendo los ejes principales perpendiculares entre sí (Figura 6-4).

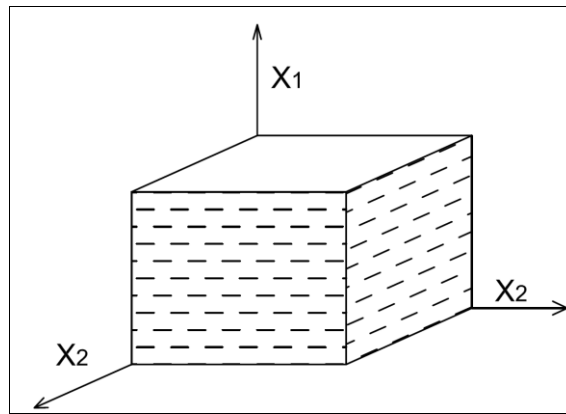


Figura 6-4. Esquema de modelo con anisotropía transversal.

Los parámetros a evaluar en este modelo serán por tanto cinco: módulo elástico según el eje de simetría  $X_1$  ( $E_1$ ), módulo elástico en las direcciones perpendiculares a este según los ejes  $X_2$  ( $E_2$ ), coeficiente de Poisson según el eje de simetría a extensión en el plano preferente ( $\nu_{12}$ ), coeficiente de Poisson en el plano perpendicular al eje de simetría ( $\nu_{22}$ ) y módulo de rigidez transversal ( $G_1$ ) suponiendo una carga perpendicular al eje de simetría. La forma matricial tendrá la siguiente configuración:

$$S = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{22}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{2(1+\nu_{22})}{E_2} & 0 & 0 \\ & \text{simétrica} & & & \frac{1}{G_1} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_1} \end{bmatrix} \quad (6-11)$$

### 6.1.3.3 Ortotropía

En este modelo existen tres direcciones principales ( $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$ ) ortogonales entre sí y con diferentes módulos de deformación (Figura 6-5). Esta circunstancia produce que los parámetros necesarios para la definición elástica del modelo sean nueve: tres módulos de deformación paralelos a cada uno de los ejes principales ( $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$ ), tres coeficientes de Poisson asociados a estas direcciones ( $\nu_{12}$ ,  $\nu_{23}$ ,  $\nu_{31}$ ), y tres módulos de rigidez transversal para cada uno de los planos principales ( $G_{12}$ ,  $G_{23}$  y  $G_{31}$ ).

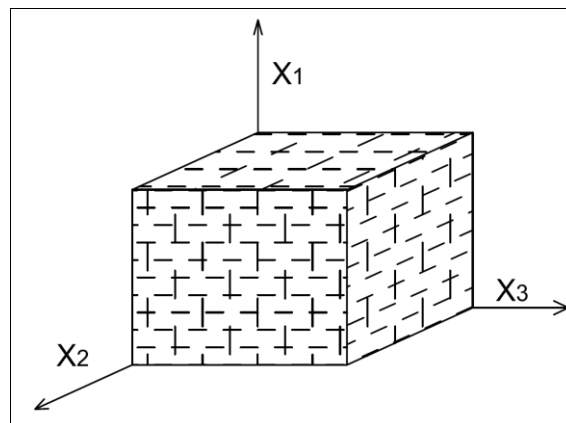


Figura 6-5. Esquema de modelo de anisotropía ortotrópica.

La matriz de flexibilidad para este caso tendrá la siguiente expresión:

$$S = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_2} & \frac{-\nu_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (6-12)$$

simétrica

#### 6.1.3.4 Anisotropía transversal por fisuración

En este modelo la roca matriz se comporta como un material elástico lineal e isótropo (véase apartado 6.1.3.1). El comportamiento anisótropo del macizo rocoso es producido por la presencia de una familia de discontinuidades (Figura 6-6). Es la deformabilidad de estos planos de discontinuidad (tanto normal como tangencial) la que crea la anisotropía.

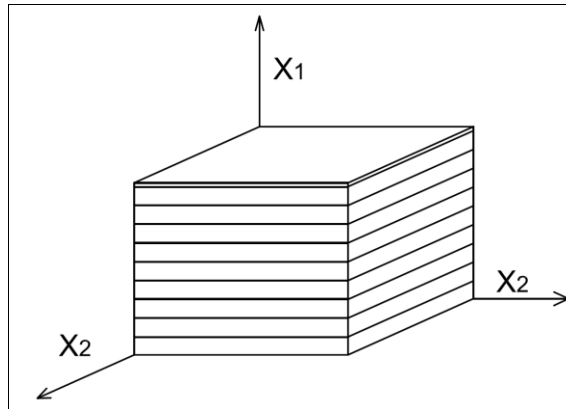


Figura 6-6. Esquema de modelo con anisotropía transversal por fisuración

La matriz de rigidez de la discontinuidad seguirá la siguiente expresión:

$$F = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_n} & -\frac{1}{k_d} \\ 0 & \frac{1}{k_s} \end{bmatrix} \quad (6-13)$$

siendo:

- $k_n$  la rigidez normal de la discontinuidad (véase apartado 6.1.2)
- $k_s$  la rigidez tangencial de la discontinuidad (véase apartado 6.1.2)
- $k_d$  la rigidez de dilatación o rigidez transversal.

A partir de esta matriz F se puede establecer la matriz  $S_D$  que representa la contribución de las discontinuidades a la rigidez global del macizo teniendo en cuenta su espaciado ( $\lambda$ ).

$$S_D = \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda \cdot k_n} & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{k_d} & \frac{-1}{k_d} \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{\lambda \cdot k_s} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{\lambda \cdot k_s} \end{bmatrix} \quad (6-14)$$

La matriz de rigidez del macizo (S) será la suma de las matrices de rigidez de la roca matriz ( $S_R$ ) y la contribución de la rigidez de las discontinuidades ( $S_D$ ).

$$S \equiv S_D + S_R \quad (6-15)$$

$$S = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} + \frac{1}{\lambda \cdot k_n} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & \frac{-1}{\lambda \cdot k_d} & \frac{-1}{\lambda \cdot k_d} \\ & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G} + \frac{1}{\lambda \cdot k_s} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G} + \frac{1}{\lambda \cdot k_s} \end{bmatrix} \quad (6-16)$$

En caso de materiales no dilatantes ( $k_d=0$ ), la matriz anterior se simplifica de la siguiente manera:

$$S = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} + \frac{1}{\lambda \cdot k_n} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ & \text{simétrica} & & & \frac{1}{G} + \frac{1}{\lambda \cdot k_s} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G} + \frac{1}{\lambda \cdot k_s} \end{bmatrix} \quad (6-17)$$

A partir de esta matriz se puede definir el módulo de deformación del macizo rocoso afectado por una familia de discontinuidades sin relleno, en la dirección perpendicularmente a estas según la siguiente expresión (Barton, 1972):

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_i} + \frac{1}{\lambda \cdot k_n} \quad (6-18)$$

siendo:

$E_c$  el módulo de deformación del macizo rocoso  
 $E_i$  el módulo de deformación de la roca matriz  
 $\lambda$  el espaciado de las discontinuidades  
 $k_n$  la rigidez normal a la discontinuidad

Esta ecuación puede ser utilizada para la obtención del coeficiente de rigidez normal de la discontinuidad mediante la siguiente conversión:

$$k_n = \frac{E_c \cdot E_i}{\lambda \cdot (E_i - E_c)} \quad (6-19)$$

Al igual que en el caso de la rigidez normal, la rigidez tangencial se relaciona con los parámetros deformacionales del macizo rocoso, en este caso con el módulo de corte  $G$ , mediante la siguiente expresión:

$$\frac{1}{G_c} = \frac{1}{G_i} + \frac{1}{\lambda \cdot k_s} \quad (6-20)$$

siendo:

$G_c$  el módulo de deformación tangencial del macizo rocoso  
 $G_i$  el módulo de deformación tangencial de la roca matriz  
 $\lambda$  el espaciado de las discontinuidades  
 $k_s$  la rigidez tangencial a la discontinuidad



A partir de las expresiones 6-18 y 6-20 podría llegarse a (Duncan y Goodman, 1968):

$$k_s = \frac{k_n}{2(1+\nu)} \quad (6-21)$$

Si se tiene en cuenta que para materiales no dilatantes el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) puede variar entre 0 y 0,5 (siendo lo normal para rocas un rango entre 0,15 y 0,30), la relación  $k_n/k_s$  variaría entre 2 y 3 (2,3 y 2,6 con los rangos normales de  $\nu$  en rocas). Si bien, desde el punto de vista de la elasticidad esta relación debería cumplirse, se ha comprobado que en macizos fisurados, y por tanto discontinuos, esta ecuación no se cumple y la relación  $k_n/k_s$  suele ser mucho más alta (Kulhawy, 1975). Barton (1972) menciona que la rigidez tangencial ( $k_s$ ) es sensiblemente inferior a la normal ( $k_n$ ) siendo razonable, para discontinuidades no alteradas y sin relleno, una relación  $k_n/k_s$  de hasta 500 o 1000 en zonas someras.

#### 6.1.3.5 Ortotropía por fisuración

Este modelo es similar a la anisotropía transversal por fisuración salvo que el macizo rocoso presenta tres familias de planos de discontinuidad dispuestos de manera ortogonal (Figura 6-7) con sus correspondientes espaciados ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  y  $\lambda_3$ ) y parámetros de rigidez ( $k_{n1}$ ,  $k_{n2}$ ,  $k_{n3}$ ,  $k_{s1}$ ,  $k_{s2}$  y  $k_{s3}$ ).

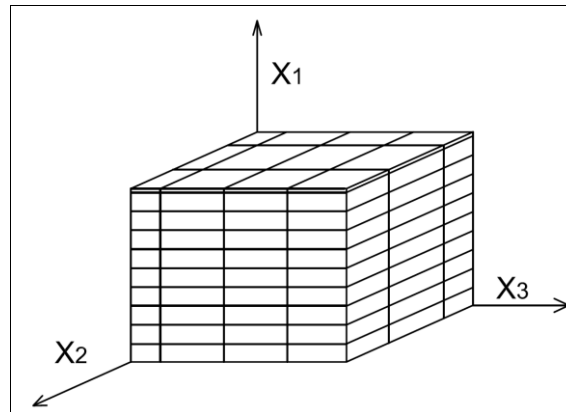


Figura 6-7. Esquema de modelo ortotrópico por fisuración

Si no se tiene en cuenta la dilatación, la forma matricial de este modelo será:

$$S = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} + \frac{1}{\lambda_1 \cdot k_{n1}} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{E} + \frac{1}{\lambda_2 \cdot k_{n2}} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{E} + \frac{1}{\lambda_3 \cdot k_{n3}} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1+\nu}{E} + \frac{1}{\lambda_2 \cdot k_{n2}} + \frac{1}{\lambda_3 \cdot k_{n3}} & 0 & 0 & \frac{1+\nu}{E} + \frac{1}{\lambda_3 \cdot k_{n3}} + \frac{1}{\lambda_1 \cdot k_{n1}} & 0 & 0 \\ \frac{1+\nu}{E} + \frac{1}{\lambda_3 \cdot k_{n3}} + \frac{1}{\lambda_1 \cdot k_{n1}} & 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu}{E} + \frac{1}{\lambda_1 \cdot k_{n1}} + \frac{1}{\lambda_2 \cdot k_{n2}} & 0 \\ \frac{1+\nu}{E} + \frac{1}{\lambda_1 \cdot k_{n1}} + \frac{1}{\lambda_2 \cdot k_{n2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu}{E} + \frac{1}{\lambda_1 \cdot k_{n1}} + \frac{1}{\lambda_2 \cdot k_{n2}} \end{bmatrix} \quad (6-22)$$

simétrica

### 6.1.4 Deformación de cavidad cilíndrica en medio anisótropo

Son varios los trabajos que abordan el tema de la deformabilidad de una cavidad cilíndrica en medios anisótropos enfocando el problema desde dos puntos de vista principales: la deformación en túneles y la obtención de parámetros geotécnicos del macizo rocoso mediante ensayos de cámaras de presión o mediante ensayos presio-dilatométricos.

Estos estudios se basan principalmente en resoluciones matemáticas con condiciones de contorno determinadas y, normalmente, los datos obtenidos solamente son utilizables en geometrías muy determinadas como buzamientos perpendiculares o paralelos a la perforación.

A continuación se describen brevemente los más relevantes.

#### 6.1.4.1 *Ensayos de carga radial*

##### 1) **Kawamoto (1966)**

En el primer congreso de la ISRM, el profesor T. Kawamoto expone una solución matemática para la deformación de una cavidad cilíndrica sometida a carga radial homogénea en un medio elástico y ortotrópico, así como la metodología para la obtención de los parámetros deformacionales del macizo rocoso a partir de dichos ensayos.

El problema se trata como una deformación plana asumiendo que los ejes de mínimo y máximo módulo de deformación ( $E_1$  y  $E_2$ ) coinciden con los ejes cartesianos  $x$  e  $y$  (Figura 6-8). La solución propuesta, por tanto, solo es aplicable en el caso de que la perforación (ya sea túnel o sondeo) sea paralela a los planos de anisotropía.

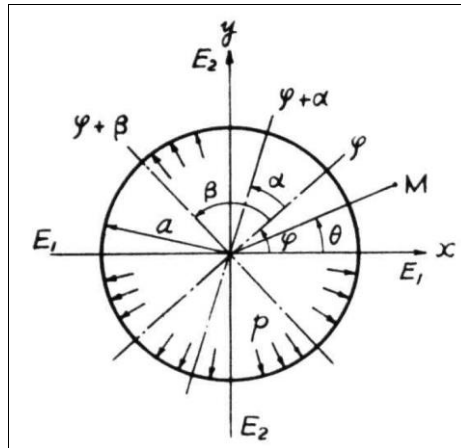


Figura 6-8. Sistema de referencia utilizado en el estudio de Kawamoto (1966).

En este tipo de medio, las soluciones propuestas para los desplazamientos radiales y tangenciales son las siguientes:

$$u_r = \frac{pa}{E_1} (\cos^2 \theta + e \sin^2 \theta + \nu_1) \quad (6-23)$$

$$u_\theta = \frac{pa}{E_1} (1 - e) \sin \theta \cos \theta \quad (6-24)$$

siendo:

- $u_r$  el desplazamiento radial en la pared de la perforación
- $u_\theta$  el desplazamiento tangencial en la pared de la perforación
- $p$  la presión aplicada a las paredes de la perforación
- $a$  el radio de la perforación
- $E_1$  el módulo de deformación máximo
- $E_2$  el módulo de deformación mínimo
- $\nu_1$  el coeficiente de Poisson en el plano  $xy$
- $e$  la relación  $E_1/E_2$ .

A partir de esta función establece que la variación de diámetro ( $\Delta D$ ) responde a la siguiente expresión:

$$\Delta D = 2u_r \sqrt{1 + \frac{u_\theta^2}{(a + u_r)^2}} + \frac{a \cdot u_\theta^2}{(a + u_r)^2} \quad (6-25)$$

Ya que  $u_r \ll a$  y  $u_\theta \ll a$  se puede asumir que  $\Delta D \approx 2u_r$  y por tanto:

$$\Delta D \approx \frac{2pa}{E_1} (\cos^2 \theta + e \sin^2 \theta + \nu_1) \quad (6-26)$$

## 2) Kiehl y Wittke (1983)

En este trabajo, recogido en Wittke (1990), se propone un método para la obtención de los parámetros deformacionales de un macizo rocoso elástico transversalmente anisótropo ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_2$ ,  $\nu_1$  y  $\nu_2$ ) sometido a carga radial homogénea mediante ensayos dilatométricos.

El método se basa en el análisis de la deformación del diámetro de la cavidad cilíndrica, cargada radialmente, medida en 4 direcciones diferentes separadas  $45^\circ$  según se representa en la Figura 6-9.

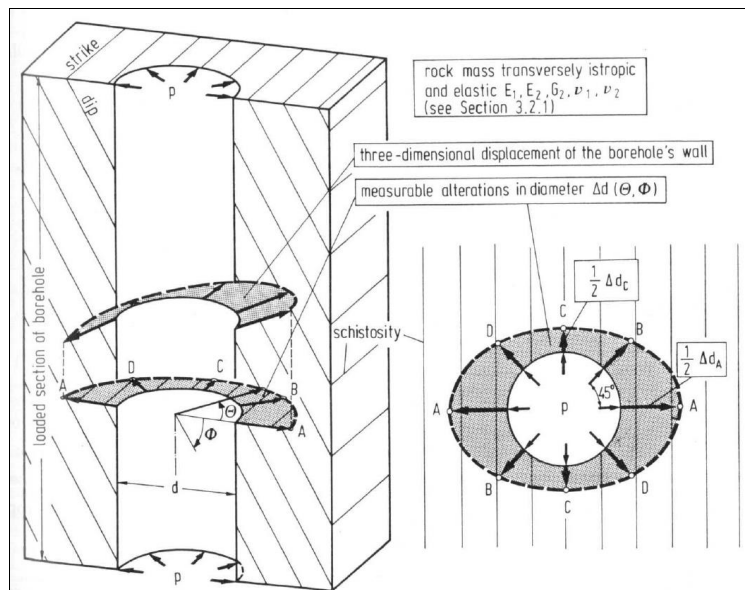


Figura 6-9. Esquema de referencia del estudio de Kiehl y Wittke (1983) para la obtención de los módulos de deformación en un macizo rocoso con anisotropía transversal.

Este trabajo estudia el medio como un material continuo y transversalmente anisótropo, caracterizado por los parámetros  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_2$ ,  $\nu_1$  y  $\nu_2$ , y no como un medio fisurado.

Llamando  $\Phi$  al ángulo entre la normal al eje del sondeo y los planos de anisotropía (Figura 6-9), para  $\Phi=0^\circ$  el ensayo se realizará en un plano isótropo y por tanto el módulo obtenido será:

$$E_1 = (1 + \nu_1)d \frac{\Delta p}{\Delta d} \quad (6-27)$$

siendo:

$E_1$  el módulo de deformación en el plano de anisotropía,  
 $\nu_1$  el coeficiente de Poisson en dicho plano,  
 $d$  el diámetro de la cavidad,  
 $\Delta p$  la carga radial aplicada, y  
 $\Delta d$  la variación del diámetro medida en cualquier dirección.

Para valores de  $\Phi$  diferentes a  $0^\circ$  el plano de ensayo ya no es isótropo y, por tanto, las deformaciones que se producirán no serán homogéneas en todas las direcciones.

Para  $\Phi=90^\circ$  los autores exponen la siguiente solución en base a la teoría de la elasticidad en medio anisótropo para estas condiciones de contorno particulares:

$$\Delta d(\theta) = (U_0 \cos^2 \theta + V_0 \sin^2 \theta) d \cdot \Delta p \quad (6-28)$$

siendo:

$\Delta d(\theta)$  la variación del radio para un ángulo  $\theta$  dado, y  
 $\theta$  el ángulo entre la dirección de medida y la dirección perpendicular a las capas  
 $U_0$  y  $V_0$  parámetros dependientes de las 5 constantes elásticas del medio.

La obtención de los parámetros  $U_0$  y  $V_0$  se realiza en base a la pendiente de las curvas del ensayo dilatómetro correspondientes a las direcciones A, B, C y D (Figura 6-9), ajustando los datos obtenidos a la ecuación anterior, según se muestra en la Figura 6-10:

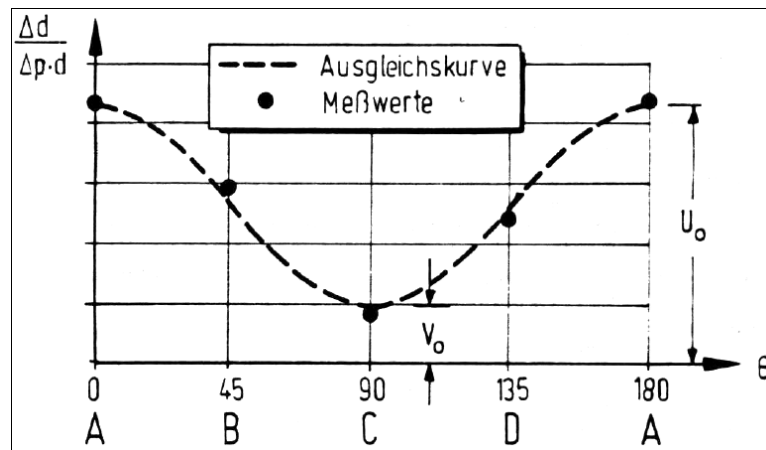


Figura 6-10. Obtención de los parámetros  $V_0$  y  $U_0$  (Kiehl y Wittke, 1983).

A partir del módulo  $E_1$ , obtenido en un ensayo realizado en una cavidad perpendicular a los planos, y los parámetros  $U_0$  y  $V_0$  se obtienen las siguientes relaciones de módulo:

$$\kappa_1 = E_1 \cdot V_0 \quad (6-29)$$

$$\kappa_2 = E_1 \cdot U_0 \quad (6-30)$$

Los autores incluyen en el trabajo un ábaco (Figura 6-11) para la obtención, a partir de de los parámetros  $\kappa$ , de las relaciones  $m$  y  $n$ , con las cuales pueden, conocido  $E_1$ , obtenerse los valores de  $E_2$  y  $G_2$ :

$$m = \frac{G_2}{E_2} \quad (6-31)$$

$$n = \frac{E_1}{E_2} \quad (6-32)$$

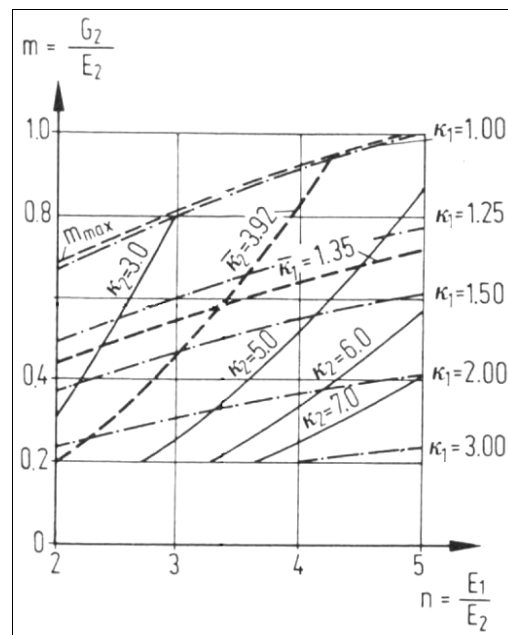
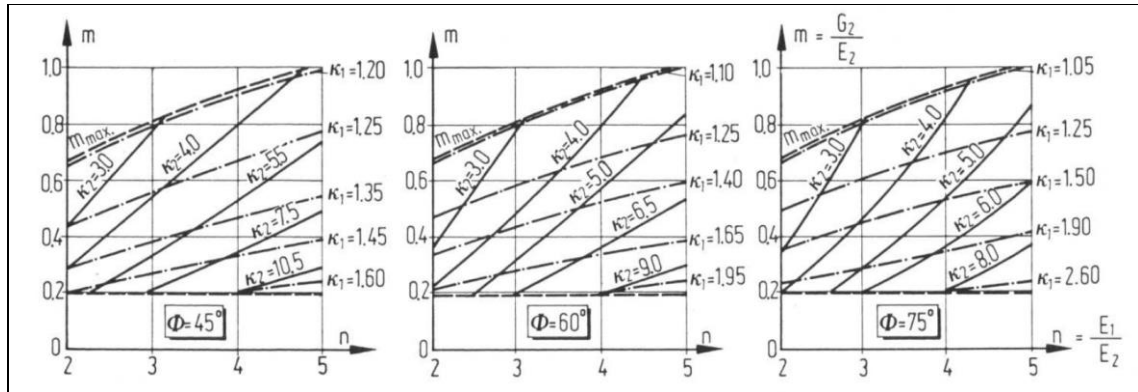


Figura 6-11. Ábacos para el análisis de ensayos dilatométricos con  $\Phi = 90^\circ$  (Kiehl y Wittke, 1983).

Este método puede ser utilizado para la obtención de los parámetros deformacionales del macizo rocoso incluso cuando la perforación no sea paralela a los planos preferentes, siempre que  $\Phi$  no sea inferior a  $40^\circ$ . En estos casos los autores presentan otros tres ábacos (Figura 6-12) a utilizar para valores de  $\Phi$  de  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $75^\circ$ . En estos casos el valor de  $\kappa_1$  se calcula de manera idéntica a los casos anteriores mientras que  $\kappa_2$  ha de calcularse de la siguiente manera:

$$\kappa_2(\Phi) = E_1 \left( \frac{U_0 \cdot V_0 \cos^2 \Phi}{\sin^2 \Phi} \right) \quad (6-33)$$


 Figura 6-12. Ábacos para el análisis de ensayos dilatométricos con  $\Phi = 45, 60$  y  $75^\circ$ .

Los autores mencionan que el parámetro  $E_1$  puede ser calculado directamente de manera suficientemente precisa cuando  $\Phi \leq 30^\circ$ .

### 3) Amadei y Savage (1991)

Estos autores proponen una solución analítica aproximada para la interpretación de ensayos de carga radial homogénea en medio anisótropo mediante análisis de medio continuo.

La interpretación del ensayo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{q} \frac{U_d}{2a} = A + B \cos 2\theta + C \sin 2\theta \quad (6-34)$$

siendo:

$q$  la carga radial aplicada

$U_d$  la variación de diámetro

$a$  el radio de la cavidad

$\theta$  el ángulo respecto al eje  $x$

$A, B$  y  $C$  parámetros dependientes de las propiedades deformacionales del macizo rocoso.

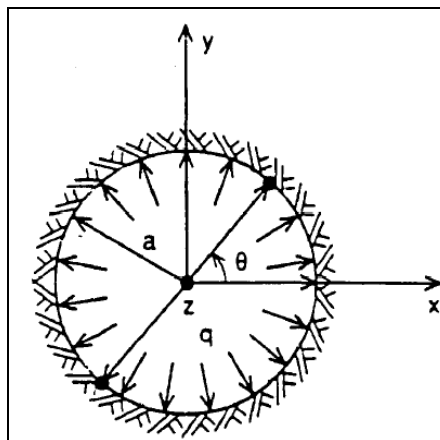


Figura 6-13. Esquema del ensayo de carga en cavidad cilíndrica (Amadei y Savage, 1991).

Para el estudio de medios anisótropos por fisuración, el medio fisurado es transformado en un medio continuo equivalente a partir de los parámetros deformacionales de la roca matriz y de

las discontinuidades. Para esta simplificación estos autores indican, basándose en Duncan y Goodman (1968), la necesidad de dar por válidas tres suposiciones:

- La rigidez normal y tangencial de las juntas es constante e independiente del nivel de esfuerzos.
- El comportamiento de las juntas se mantiene en el campo puramente elástico (estado previo al deslizamiento).
- El espesor de las discontinuidades es despreciable y no crea ningún “efecto Poisson”.

La transformación se realiza mediante los parámetros adimensionales  $\alpha_n$  y  $\alpha_s$ :

$$\alpha_n = \frac{E}{(1-\nu^2)k_n\lambda} \quad (6-35)$$

$$\alpha_s = \frac{E}{(1-\nu^2)k_s\lambda} \quad (6-36)$$

Utilizando estos parámetros, los coeficientes A, B y C se obtendrían de la siguiente manera:

Para el caso de juntas paralelas al eje yz

$$A = \frac{\frac{1-\nu^2}{2} \left[ \frac{2\nu}{1-\nu} + (1+\alpha_n + \sqrt{1+\alpha_n}) \times \sqrt{\frac{2+\alpha_s}{1+\alpha_n} + \frac{2}{\sqrt{1+\alpha_n}}} - 2\sqrt{1+\alpha_n} \right]}{E} \quad (6-37)$$

$$B = \frac{\frac{1-\nu^2}{2} \left[ (1+\alpha_n - \sqrt{1+\alpha_n}) \times \sqrt{\frac{2+\alpha_n}{1+\alpha_n} + \frac{2}{\sqrt{1+\alpha_n}}} \right]}{E} \quad (6-38)$$

Para el caso de juntas paralelas al eje xz

$$A = \frac{\frac{1-\nu^2}{2} \left[ \frac{2\nu}{1-\nu} + (1 + \sqrt{1+\alpha_n}) \times \sqrt{2+\alpha_s + 2\sqrt{1+\alpha_n}} - 2\sqrt{1+\alpha_n} \right]}{E} \quad (6-39)$$

$$B = \frac{\frac{1-\nu^2}{2} \left[ (1 - \sqrt{1+\alpha_n}) \times \sqrt{2+\alpha_s + 2\sqrt{1+\alpha_n}} \right]}{E} \quad (6-40)$$

Para el caso de juntas paralelas al eje xy (Figura 6-14)

$$A = (1-\nu^2)/E \quad \text{y} \quad B = 0$$

El coeficiente C es despreciable para los casos en los que el eje de la perforación sea paralelo o perpendicular a los planos de anisotropía.

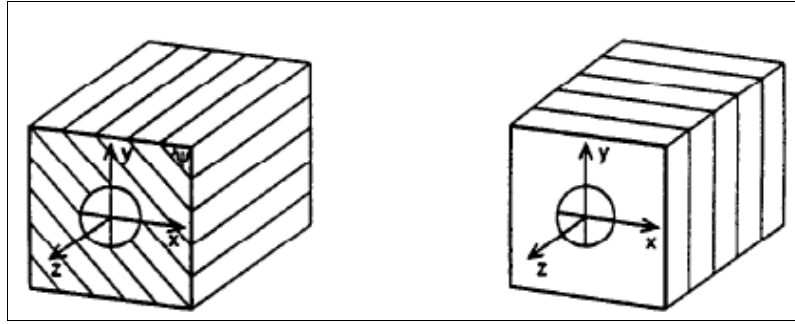


Figura 6-14. Tipos de anisotropías estudiadas (Amadei y Savage, 1991).

Para la obtención de todos los parámetros de deformabilidad del macizo rocoso ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_2$  ó  $E$ ,  $k_n$  y  $k_s$ ) hace falta la realización de 2 ensayos con orientaciones diferentes: uno con la perforación paralela a los planos de anisotropía, y otra con la perforación perpendicular a los planos de anisotropía (Figura 6-14).

La realización de un ciclo de descarga-recarga, con una carga suficiente para que se hubiera producido un cierre plástico de todas las fisuras involucradas en el ensayo, permitiría la obtención de los parámetros correspondientes a un ensayo realizado en una perforación perpendicular a los planos de anisotropía.

#### 4) Kolymbas *et al.* (2012)

En este trabajo, en el que se amplía lo anteriormente publicado por Blioumi y Kolymbas (2010) y Blioumi y Kolymbas (2011), se presenta un método analítico aproximado para la obtención de los parámetros deformacionales de un medio elástico lineal anisótropo, mediante ensayos de expansión en una cavidad cilíndrica. Los autores señalan que la obtención de una solución analítica rigurosa no ha sido encontrada.

Basándose en la ecuación exacta para un medio isótropo concluyen que la deformación de la cavidad solamente depende del estado de tensiones de la roca adyacente y, por tanto, el estado general de tensiones del macizo rocoso puede no ser tenido en cuenta.

Basándose en la ecuación de deformación para un material isótropo se obtiene que:

$$\Delta u = \frac{\Delta p \cdot r_0}{\frac{\partial T_{11}}{\partial E_{11}} - \frac{\partial T_{11}}{\partial E_{22}}} \quad (6-41)$$

con

$$\frac{\partial T_{11}}{\partial E_{11}} = a_1 + a_2(n_1 n_1 + n_1 n_1) + a_3 + a_4 n_1 n_1 n_1 n_1 + 2a_5 n_1 n_1 \quad (6-42)$$

$$\frac{\partial T_{11}}{\partial E_{22}} = a_1 + a_2(n_1 n_1 + n_2 n_2) + a_4 n_1 n_1 n_2 n_2 \quad (6-43)$$

siendo:

$\Delta u$  la deformación radial  
 $\Delta p$  la tensión radial aplicada  
 $r_0$  el radio inicial de la cavidad  
 $T_{ij}$  las componentes del tensor de tensiones



$E_{ij}$  las componentes del tensor de deformaciones

$n_x$  las componentes del vector director de los planos de anisotropía

$a_x$  parámetros de deformabilidad del macizo rocoso

Expresando la orientación de los planos de anisotropía en el sistema local de coordenadas cilíndricas, siguiendo la notación de la Figura 6-15, y siendo  $\mathbf{k}$  el vector unitario según la dirección radial en la que se realiza la medida:

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{\Delta p \cdot r_0} \left( \frac{\partial T_{11}}{\partial E_{11}} - \frac{\partial T_{11}}{\partial E_{22}} \right) = \frac{1}{\Delta p \cdot r_0} (q_2 a_2 + q_3 a_3 + q_4 a_4 + q_5 a_5) = \frac{1}{\Delta p \cdot r_0} \sum_j q_j a_j \quad (6-44)$$

con

$$q_2 = n_r^2 - n_\phi^2, \quad q_3 = 1, \quad q_4 = n_r^2 (n_r^2 - n_\phi^2) \quad \text{y} \quad q_5 = 2n_r^2$$

siendo:

$$\mathbf{n} = (\cos \alpha \cdot \sin \beta, -\sin \alpha \cdot \sin \beta, \cos \beta)$$

$$n_r = \mathbf{n} \cdot \mathbf{k}$$

$$n_s = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{k} \times \mathbf{m})$$

$$n_z = \mathbf{n} \cdot \mathbf{m}$$

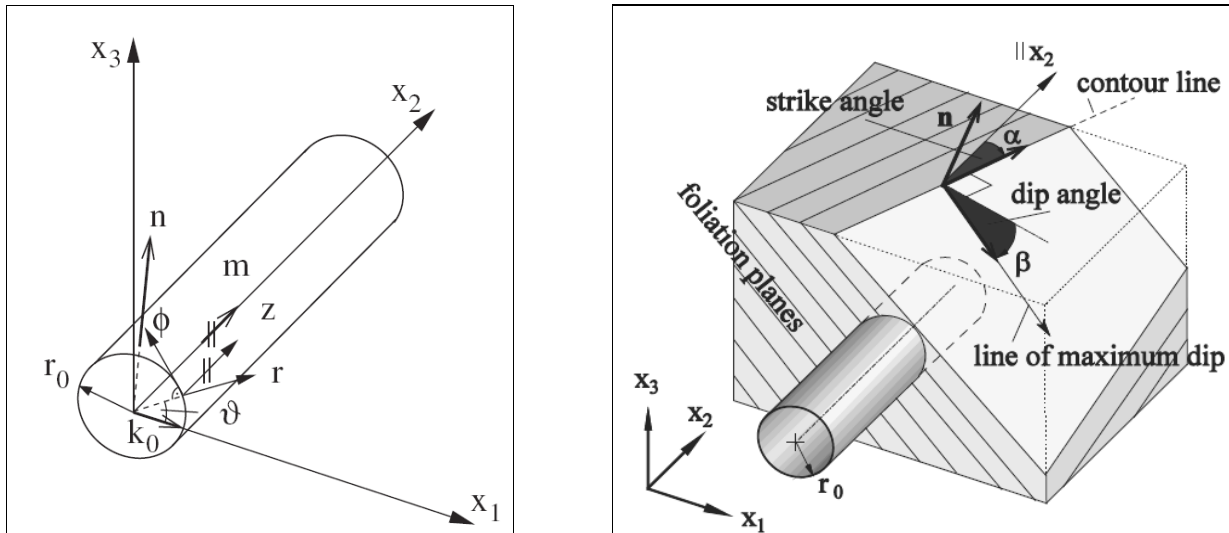


Figura 6-15. Esquema de orientación de los ejes, vectores principales y notación utilizada (Kolymbas *et al.*, 2012).

Debido a que la deformación se produce sin cambio de volumen, el parámetro  $a_1$  se hace igual a 0. Por tanto, la deformabilidad de un macizo rocoso quedaría definida por 4 parámetros:  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  y  $a_5$ . Estos 4 parámetros pueden ser obtenidos de manera aproximada mediante la optimización por mínimos cuadrados de la ecuación 6-44 respecto a las deformaciones medidas en cada dirección. La solución obtenida no es unívoca y por tanto la caracterización completa del macizo rocoso mediante este método no es posible utilizando un solo ensayo.

Los autores aplican, a modo de comprobación, este método con los datos de un ensayo de gato radial (Figura 6-16).

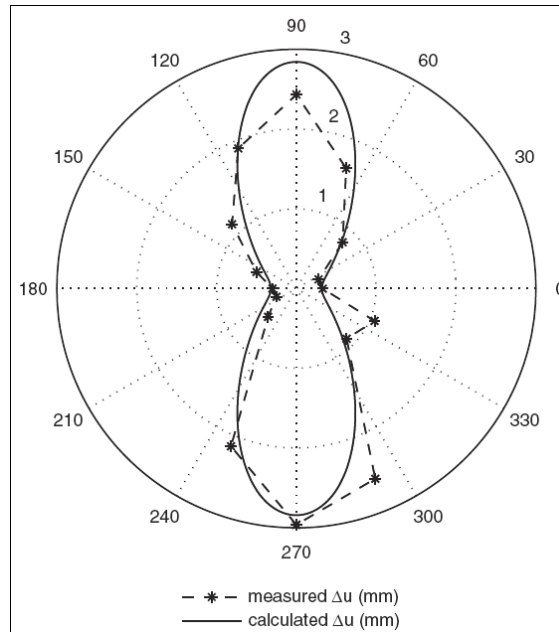


Figura 6-16. Comparación entre los datos medidos con gato radial y los calculados (Kolymbas *et al.*, 2012).

#### 6.1.4.2 Deformabilidad de túneles

##### 1) Hefny y Lo (1999)

Este trabajo presenta una solución aproximada para el estado de esfuerzos y deformaciones producidos por la excavación de un túnel en un material anisótropo. Se supone que el eje del túnel es paralelo a los planos de anisotropía (Figura 6-17). Los módulos de deformación principales coinciden con los ejes cartesianos, siendo  $E_v$  el módulo de deformación en dirección vertical y  $E_h$  el módulo de deformación en el plano horizontal isótropo.

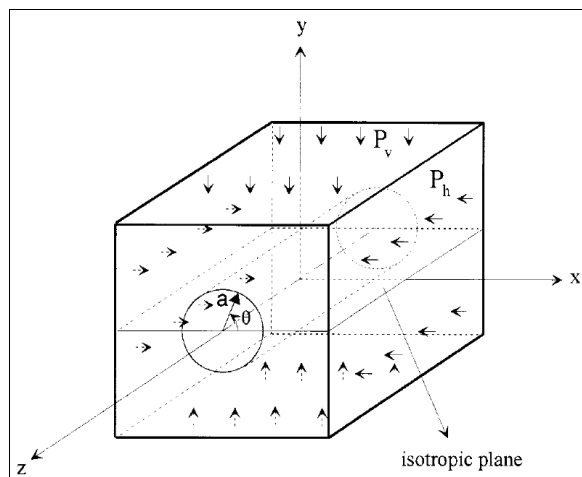


Figura 6-17. Representación del sistema de coordenadas utilizado (Hefny y Lo, 1999).

Según el sistema de referencia utilizado, el problema se trata como una deformación plana siguiendo la siguiente relación:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (6-45)$$

donde

$$S_{11} = \frac{1-\nu_h^2}{E_h}, \quad S_{22} = \frac{1-\nu_{hv}\nu_{vh}}{E_v}, \quad S_{12} = S_{21} = -\frac{\nu_{hv}(1+\nu_h)}{E_v}, \quad S_{33} = \frac{1}{G_{vh}}$$

Los esfuerzos y deformaciones debidos a la perforación de un túnel, basándose en lo publicado por Green y Zerna (1968), son obtenidos en términos de potenciales complejos. A partir de esta teoría, se obtiene la siguiente solución aproximada para un túnel excavado en un medio anisótropo sometido a una tensión vertical  $P_v$  y a una tensión horizontal  $P_h$ :

$$u_a = \frac{a}{2(\gamma_1 - \gamma_2)} \{ P_0(\gamma_2\rho_1 - \gamma_1\rho_2) + Q_0(\rho_1 - \rho_2) + [P_0(\gamma_2\delta_1 - \gamma_1\delta_2) + Q_0(\delta_1 - \delta_2)]\cos 2\theta \} \quad (6-46)$$

$$u_\theta = \frac{a}{2(\gamma_1 - \gamma_2)} [P_0(\gamma_1\delta_2 - \gamma_2\delta_1) + Q_0(\delta_2 - \delta_1)]\sin 2\theta \quad (6-47)$$

siendo:

$u_a$  el desplazamiento radial  
 $u_\theta$  el desplazamiento tangencial  
 $a$  el radio del túnel

$$P_0 = ((P_h + P_v)/2), \quad Q_0 = ((P_h - P_v)/2) \quad (6-48)$$

$$\delta_1 = (1 + \gamma_1)\beta_2 - (1 - \gamma_1)\beta_1, \quad \delta_2 = (1 + \gamma_2)\beta_1 - (1 - \gamma_2)\beta_2 \quad (6-49)$$

$$\rho_1 = (1 + \gamma_1)\beta_2 + (1 - \gamma_1)\beta_1, \quad \rho_2 = (1 + \gamma_2)\beta_2 + (1 - \gamma_2)\beta_1$$

$$\alpha_1^2\alpha_2^2 = \frac{S_{11}}{S_{22}}, \quad \alpha_1^2 + \alpha_2^2 = \frac{2S_{12} + S_{33}}{S_{22}} \quad (6-50)$$

$$\gamma_1 = \frac{\alpha_1 - 1}{\alpha_1 + 1}, \quad \gamma_2 = \frac{\alpha_2 - 1}{\alpha_2 + 1} \quad (6-51)$$

En el caso de la deformación debida a la presurización interior de un túnel, para una presión interna  $P_i$ , los desplazamientos producidos en la pared de la excavación serían:

$$u_a = \frac{aP_i}{2(\gamma_1 - \gamma_2)} [(\gamma_1\rho_1 - \gamma_2\rho_1) + (\gamma_1\delta_1 - \gamma_2\delta_1)\cos 2\theta] \quad (6-52)$$

$$u_{\theta} = \frac{aP_i}{2(\gamma_1 - \gamma_2)} (\gamma_2 \delta_1 - \gamma_1 \delta_2) \sin 2\theta \quad (6-53)$$

Como conclusiones al estudio, los autores apuntan, entre otros datos, que:

- El efecto de  $\nu_h$  es despreciable tanto en esfuerzos como en deformaciones.
- En la solera los desplazamientos dependen de  $\nu_{vh}$ .
- Los desplazamientos radiales en la paredes del túnel son muy sensibles, de manera directa, con la relación  $E_h/G_{vh}$ .
- Para cualquier valor de  $K_0$  los desplazamientos radiales en los flancos son poco dependientes con la relación  $E_h/E_v$ .
- La magnitud y dirección de los desplazamientos radiales en la solera es muy sensitivo a la relación  $E_h/E_v$ , especialmente para valores de  $\nu$  mayores a 0,2.

## 2) Fortsakis et al. (2012)

Este trabajo estudia tres diferentes procedimientos para la modelización de un macizo rocoso, con anisotropía debida a planos de discontinuidad, analizando sus diferencias y las implicaciones de estas en el cálculo de la estabilidad de un túnel. Los tres métodos propuestos son los siguientes:

- Modelo isótropo. Simulación de un macizo rocoso isótropo con parámetros derivados a partir del *Geological Strength Index* (GSI), teniendo en cuenta todas las discontinuidades.
- Modelo anisótropo discontinuo. Simulación de las “discontinuidades dominantes” que generan la anisotropía en el macizo rocoso y, por otro lado, una matriz rocosa isótropa (*internal rockmass*) que incorpore las características de las posibles discontinuidades secundarias (Figura 6-19).
- Modelo anisótropo continuo. Simulación de un material continuo transversalmente anisótropo (*reference stratified rockmass*) que incorpore las características de la roca matriz y las debidas a las discontinuidades (Figura 6-19).

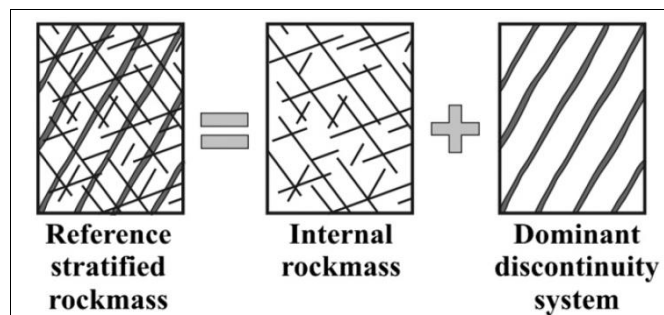


Figura 6-18. Simulación de un macizo anisótropo mediante roca matriz y una familia dominante de discontinuidades (Fortsakis et al., 2012).

Para la simulación del macizo como un medio continuo, suponiendo que la deformabilidad de un macizo es la suma de la deformabilidad de la roca matriz más la de las discontinuidades, los parámetros equivalentes a utilizar en los cálculos, basándose en los trabajos de Barton (1972) y Goodman (1989), pueden obtenerse mediante las ecuaciones 6-18 y 6-20 (véase apartado 6.1.3.4).

A partir de estas premisas, los autores realizaron un análisis numérico mediante el código de elementos finitos Phase<sup>2</sup> v.6 (Rocscience-Inc., 2006).

Los criterios de rotura utilizados fueron el de Hoek-Brown (Hoek *et al.*, 2002) para la roca matriz y Barton-Bandis (1990) para las discontinuidades. El módulo de deformación fue calculado mediante la correlación propuesta por Hoek y Diedrich (2006) a partir del GSI. Los cálculos se realizaron con diferentes sostenimientos y cobertera. El coeficiente K fue tomado igual a 1. La simulación se realizó con el eje del túnel paralelo a la dirección de las capas y para buzamientos ( $\beta$ ) de 0°, 30°, 45°, 60° y 90°.

En la Figura 6-19 y en la Figura 6-20 se muestra una comparación entre las convergencias calculadas siguiendo los métodos de modelización anteriormente mencionados. El método que presenta mayores deformaciones es la simulación por separado de la roca matriz y de la familia de planos principales mediante el modelo anisótropo discontinuo. La relación entre las convergencias depende del ángulo  $\alpha$  entre la dirección de medida y el buzamiento (Figura 6-21). A la vista de estas figuras se observa como las mayores diferencias aparecen en las direcciones perpendiculares a los planos de discontinuidad ( $\alpha=90^\circ$  y  $\alpha=270^\circ$ ).

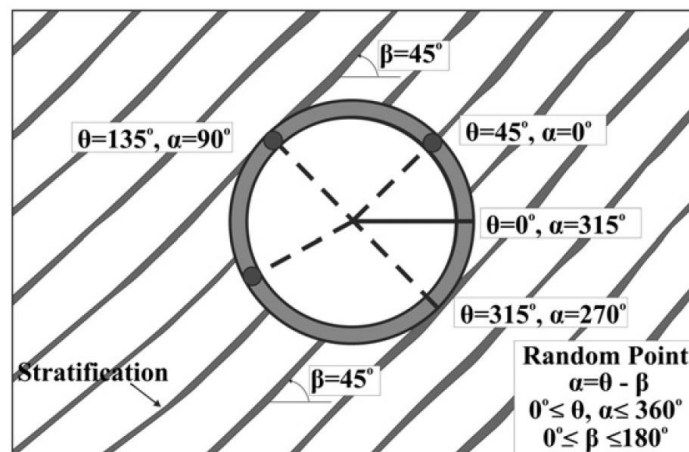


Figura 6-19. Definición del ángulo  $\alpha$  (Fortsakis *et al.*, 2012).

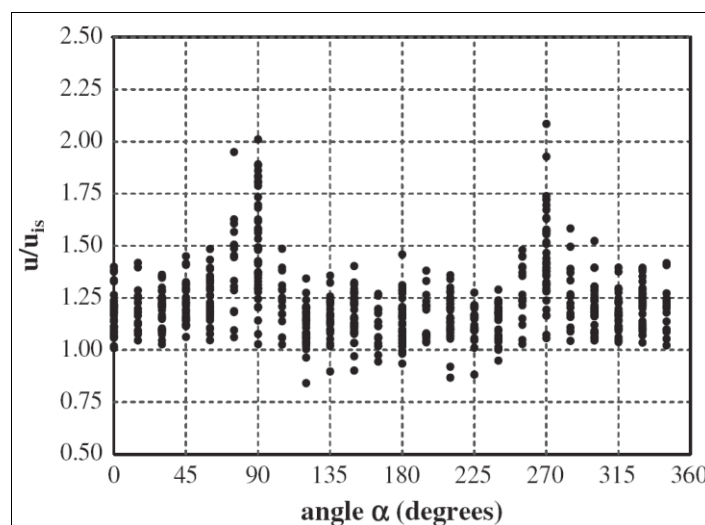


Figura 6-20. Relación entre las convergencias calculadas con el modelo anisótropo discontinuo ( $u$ ) y las calculadas con el modelo isótropo ( $u_{is}$ ) (Fortsakis *et al.*, 2012).

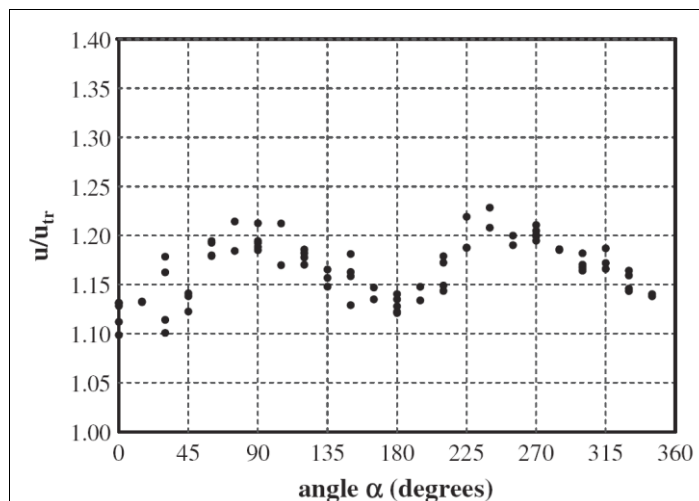


Figura 6-21. Relación entre las convergencias calculadas con el modelo anisótropo discontinuo ( $u$ ) y las calculadas con el modelo anisótropo continuo ( $u_{tr}$ ) (Fortsakis *et al.*, 2012).

En base a estos resultados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La modelización de un macizo rocoso estratificado como un macizo continuo con anisotropía (modelo anisótropo continuo) puede llevar a infraestimar de manera importante las deformaciones. Por tanto, la metodología propuesta es la modelización del macizo rocoso mediante la separación de la roca matriz y las discontinuidades (modelo anisótropo discontinuo).
- Los parámetros necesarios para la aplicar la metodología propuesta ( $E_i$ ,  $G_i$ ,  $\lambda$ ,  $k_n$  y  $k_s$ ) son fácilmente medibles a partir de ensayos habituales en la mecánica de rocas.

### 3) Wang y Huang (2013)

Este trabajo analiza la deformación de familias de discontinuidades, debida a la modificación de esfuerzos durante la excavación de un túnel. El análisis utiliza un modelo constitutivo tridimensional y no lineal y una metodología de cálculo bidimensional asociada a este, para macizos rocosos con familias de juntas ubicuas distribuidas uniformemente (Wang y Huang, 2009). Los cálculos son realizados mediante FLAC 2D (Itasca, 2000).

El cálculo tiene en cuenta tanto la deformabilidad como la resistencia de las diferentes familias de juntas y de la roca matriz, permitiendo el estudio de las deformaciones pre y post-pico, así como los mecanismos de rotura en cada caso.

En el comportamiento de las juntas se tiene en cuenta el cierre máximo,  $u_n^m$  (Bandis *et al.*, 1983) que limita la deformación máxima que puede sufrir una junta. La rugosidad se supone isotropa y homogénea a lo largo de cada discontinuidad.

La validez del modelo de comportamiento está refrendada por la comparación de la resistencia, deformación y forma de rotura, con ensayos de compresión simple en laboratorio.

Para el análisis de la influencia de la fracturación en un túnel, se modelizó una excavación circular de 10 m de diámetro en un modelo de 160 x 160 m para evitar cualquier efecto de borde. Este modelo fue estudiado con diferentes números de familias, diferentes comportamientos resistentes de las juntas y diferentes confinamientos siguiendo el esquema geométrico de la Figura 6-22.

En el caso de una sola familia de discontinuidades, la mayor deformación observada se produce en dirección perpendicular a estas (Figura 6-23).

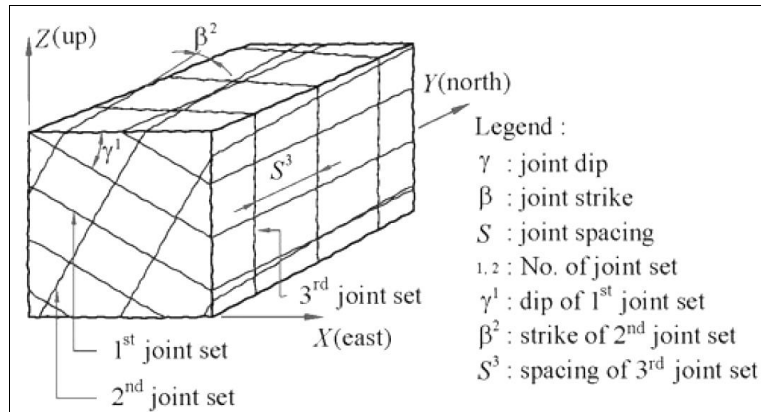


Figura 6-22. Esquema de la orientación y espaciado de las juntas (Wang y Huang, 2013).

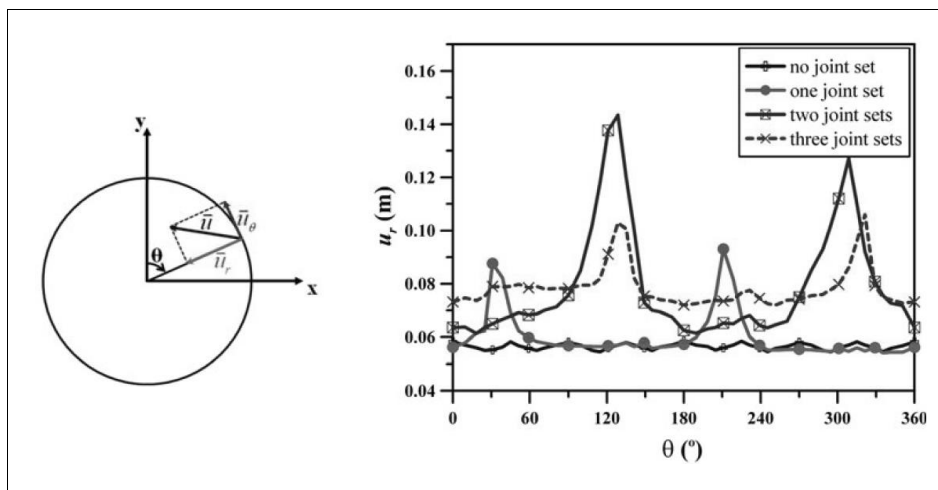


Figura 6-23. Variación del desplazamiento radial para diferentes números de familias. Para el caso de una sola familia, esta tiene un ángulo de buzamiento de 30° (Wang y Huang, 2013).

El estudio destaca la importancia del deslizamiento de las fracturas en la deformación medida, destacando así la necesidad del empleo de un modelo discontinuo en este tipo de medios.

### 6.1.5 Métodos numéricos en geotecnia

Con el fin de optimizar la interpretación de los ensayos presiométricos a realizar en macizos rocosos anisótropos, se ha estudiado la deformación de una cavidad cilíndrica en este tipo de medio.

Como se ha visto anteriormente, el problema de la expansión de una cavidad cilíndrica en un medio anisótropo no está totalmente resuelto para un medio continuo, y mucho menos para un medio discontinuo. En esta Tesis Doctoral se pretende abordar este problema desde el punto de vista empírico, mediante la simulación de ensayos presiométricos con diferentes códigos numéricos.

En la actualidad existen diferentes metodologías de simulación tenso-deformacional aplicables a problemas geotécnicos, con diferentes características.

A continuación se recogen las principales características de los métodos de cálculo numérico empleados en este trabajo: elementos finitos, diferencias finitas y elementos discretos.

#### 6.1.5.1 *Métodos de elementos finitos*

Este método se basa en la resolución del problema físico planteado mediante ecuaciones algebraicas en forma matricial, en lugar de la resolución de ecuaciones diferenciales complejas. Por este motivo, la geometría continua del problema se debe subdividir (“discretizar”) en elementos discretos más pequeños (“elementos finitos”) interconectados entre sí por unos puntos llamados nodos.

La información se transmite de un elemento a otro únicamente a través de estos puntos, por lo que la variable “nodal” no se calcula para la totalidad del modelo, sino únicamente en los nodos. A partir de los valores obtenidos en esos puntos, mediante las adecuadas funciones de forma que dependen de la tipología del elemento empleado, se calculan los valores a considerar en el interior de los elementos.

La variable fundamental a obtener está relacionada con el tipo de problema a resolver. Así, en un problema mecánico, la variable será el campo de desplazamientos; en un problema de filtración, la variable será la energía del agua; en un análisis térmico será la temperatura; etc.

Centrándose en la resolución de un problema mecánico (tenso-deformacional), a partir del conocimiento de los movimientos de todos los puntos, se pueden obtener las deformaciones en cada dirección. Aplicando la correcta ecuación constitutiva del material, a partir de estas deformaciones, se pueden obtener las tensiones asociadas, cuya integración constituyen las fuerzas internas del modelo. Si la diferencia entre estas fuerzas con las aplicadas externamente (fuerzas exteriores) es inferior a una tolerancia admitida, se considera que la solución del modelo es suficientemente adecuada.

Para obtener los movimientos en todos los nodos, el código numérico debe resolver la ecuación que minimiza la energía potencial total estacionaria, que se considera que es la solución al problema mecánico ( $F = Kd$ ). Por tanto, se debe montar la matriz de rigidez del sistema e invertirla para obtener los desplazamientos ( $K^{-1}F = d$ ). De esta manera, si la matriz de rigidez no está suficientemente condicionada (el modelo no tiene suficientes condiciones de contorno) su determinante será nulo y la obtención de los movimientos ( $d$ ) será imposible.

Con este método, cuando se realiza un cálculo no lineal, este debe realizarse mediante incrementos de carga, actualizándose la matriz de rigidez según diferentes algoritmos, con un notable esfuerzo computacional. Sin embargo, cuando el cálculo es elástico lineal, con un único incremento de carga es suficiente para alcanzar la carga final.

Este método computacional es el empleado por programas como Phase<sup>2</sup> (Rocscience-Inc., 2010) o Plaxis (Plaxis, 2004).

#### 6.1.5.2 *Métodos de diferencias finitas*

En este método de cálculo, la discretización del volumen se realiza mediante la división del mismo en diferentes zonas (habitualmente con forma de hexaedro o tetraedro) con un punto (*grid point*) en cada vértice. En cada uno de estos puntos se impone la segunda ley de Newton ( $F = ma$ ) para obtener la relación entre las fuerzas nodales y las aceleraciones producidas. El



cálculo incorpora como variable fundamental la velocidad de los puntos de la malla, con cuya derivación temporal permite obtener la aceleración de los mismos.

Según lo dicho anteriormente, surge el concepto tiempo, incluso en los cálculos estáticos, ya que se debe realizar un número suficiente de pasos de carga (formulación explícita) como para que la perturbación mecánica que se introduce se transmita a todo el modelo. Para evitar las oscilaciones indefinidas, se introduce un amortiguamiento importante (del orden del 25 % del crítico).

El algoritmo matemático no necesita obtener ninguna matriz de rigidez, por lo que no requiere ninguna capacidad específica de almacenamiento en el ordenador. De esta manera se pueden resolver problemas de geometría compleja y extensa en ordenadores no especialmente potentes, aunque con un notable tiempo de computación.

Al contrario de lo mencionado en el método de elementos finitos, en este método el modelo puede estar insuficientemente condicionado, ya que no se requiere la inversión de ninguna matriz.

Como desventaja importante en su uso, no se obtiene ningún ahorro de tiempo de cálculo frente a un modelo elasto-plástico cuando se resuelve un problema elástico y lineal, tal y como ocurre en el método de elementos finitos.

Este es el método utilizado por programas como FLAC (Itasca, 2000).

#### 6.1.5.3 *Métodos de elementos discretos*

Esta metodología de cálculo, formulada para la resolución de problemas que involucran volúmenes con numerosas superficies de discontinuidad, pretende establecer el comportamiento entre bloques en función de las fuerzas que actúan entre sus caras comunes.

El algoritmo de cálculo presenta un muy marcado carácter no lineal ya que debe comprobar en cada momento si se produce el contacto o despegue entre todas las superficies y, si se da la primera hipótesis, establecer el equilibrio de cada bloque.

Los primeros códigos numéricos que se empleaban, consideraban que el material que formaban los bloques era indeformable (consideración de sólido rígido) y únicamente se introducían en el modelo los parámetros resistentes (habitualmente con comportamiento tipo Mohr-Coulomb) y deformacionales en cada junta (rigidez tangencial y normal). Actualmente, se ha introducido un segundo tipo de comportamiento de los bloques pudiendo definir elementos deformables. Estos bloques se subdividen en múltiples zonas y, mediante la metodología de las diferencias finitas, se incorporan en los cálculos la interrelación entre las deformaciones de los mismos y las tensiones de las superficies que los delimitan.

Este método de cálculo es el empleado por programas como el 3DEC (Itasca Consulting Group, 2011).

## 6.2 **Comparación entre modelos continuos y discontinuos**

Si bien para los cálculos ingenieriles habituales existe un margen de error amplio en cuanto a los módulos de deformación de un macizo rocoso, a la hora de interpretar un ensayo de

expansión de cavidad cilíndrica (presio-dilatómetro, gato radial, cámara presurizada, etc.), la utilización de un método incorrecto en la interpretación de los resultados, dadas las pequeñas deformaciones producidas, puede llevar a estimaciones de los parámetros deformacionales muy alejadas de la realidad geotécnica del macizo rocoso. Esto hace que la elección de un modelo del terreno sea un punto delicado y que en muchas ocasiones no se estudia de manera adecuada.

Como se expone en Fortsakis *et al.* (2012), la modelización numérica de un macizo rocoso con anisotropía debida a la presencia de una familia de discontinuidades, puede realizarse de diferentes maneras (Figura 6-24): como un medio isótropo con discontinuidades (modelo discontinuo) o como un medio continuo anisótropo (modelo continuo). La evolución de la informática ha permitido en los últimos años, la aparición de programas comerciales (de elementos discontinuos o de elementos finitos o diferencias finitas) que modelizan las discontinuidades y permiten la realización de cálculos en modelos discontinuos.



Figura 6-24. Esquema de los diferentes métodos de modelización. Modificado de Fortsakis *et al.* (2012)

Los cálculos mediante elementos discontinuos presentan una mayor dificultad y tiempo de cálculo y su uso puede no estar justificado en todos los casos. En este estudio se pretende contrastar las dos metodologías de modelización, viendo el rango de aplicabilidad que tienen a la hora de interpretar ensayos de deformabilidad de cavidades cilíndricas en macizos con anisotropía fisural.

La diferencia entre los métodos de modelización de este tipo de macizos fue analizada, en el caso de las deformaciones elásticas y plásticas producidas por la excavación de túneles, por Fortsakis *et al.* (2012). En este trabajo se describen importantes diferencias entre las deformaciones calculadas con los distintos métodos (véase apartado 6.1.4.2). Aquí se pretende estudiar este fenómeno en el caso de ensayos de carga radial.

### 6.2.1 Metodología

Esta parte del estudio se lleva a cabo a través de dos enfoques diferentes:

- Influencia de la posición de las discontinuidades: teniendo en cuenta que, si el modelo continuo y el discontinuo son igualmente válidos para el cálculo de la deformación de una cavidad cilíndrica en un medio con anisotropía transversal por fisuración, los resultados obtenidos por ambos métodos deberían ser iguales con independencia de la posición relativa de las discontinuidades respecto al eje de la cavidad; se compararán los resultados obtenidos y la influencia de la posición de las discontinuidades con ambos métodos.

- b) Efecto escala: partiendo de la idea de que, si ambos métodos son equivalentes, el espaciado de las discontinuidades ( $\lambda$ ) respecto al radio de la cavidad ( $R_0$ ) no influiría en los resultados; se compararán los resultados obtenidos con ambos métodos para diferentes relaciones  $R_0/\lambda$ .

#### 6.2.1.1 Modelos empleados

Los cálculos se han realizado mediante dos programas diferentes: el programa Phase<sup>2</sup> v.7.0 (Rocscience Inc., 2010) que realiza cálculos en 2D mediante el método de elementos finitos; y el programa 3DEC v.4.1 (Itasca Consulting Group, 2011) que realiza cálculos 3D mediante elementos discontinuos y diferencias finitas. Con estos dos programas se han modelizado diferentes ensayos de expansión de cavidad cilíndrica en régimen elástico (Tabla 6-2).

Tabla 6-2. Cálculos realizados para la comparación entre modelos continuos y discontinuos.

Propósito	Modelos	Programa	Buzamiento, $\beta$ (°)	Anisotropía, $E_1/E_2$	Posición de las discontinuidades
Influencia de la posición de las discontinuidades	Discontinuo 2D	Phase <sup>2</sup>	90	3	Centrado y desplazado $\lambda/2$ , $\lambda/4$ y $\lambda/6$
Efecto escala	Continuo 2D	Phase <sup>2</sup>	90	1,33; 2 y 3	Centrado
	Discontinuo 2D	Phase <sup>2</sup>	90	1,33; 2 y 3	
	Continuo 3D	3DEC	90	1,33; 2 y 3	
	Discontinuo 3D	3DEC	90	1,33; 2 y 3	

Los modelos utilizados en los cálculos se describen a continuación:

#### a) Modelos en Phase<sup>2</sup>

- Bloque cuadrado de 2 x 2 m
- Cavidad circular centrada de radio 0,05 m
- $E_1$  horizontal
- $E_2$  vertical
- $\nu_1 = \nu_2 = 0,3$
- 1 familia de discontinuidades paralelas y con extremos abiertos
- Buzamiento de las discontinuidades paralelo al eje de la cavidad  $\beta = 90^\circ$ .
- Carga radial homogénea de 10 MPa
- Tensiones *in situ* isótropas de 5 MPa

En las siguientes figuras puede observarse el modelo utilizado en el cálculo para medio continuo (Figura 6-25) y medio fisurado (Figura 6-27) así como los resultados para medio continuo (Figura 6-26) y medio fisurado (Figura 6-28).

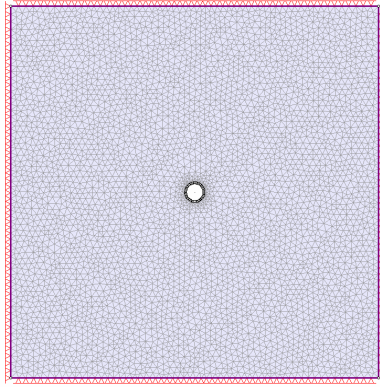


Figura 6-25. Modelo Continuo.  $E_1/E_2 = 2$ .

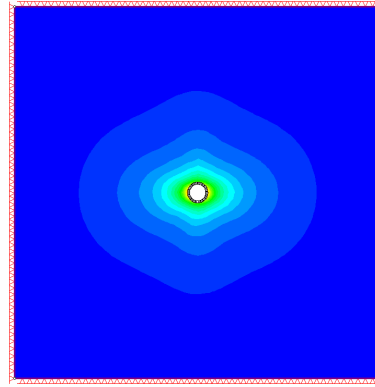
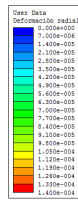


Figura 6-26. Resultados del Modelo Continuo.  $E_1/E_2 = 2$

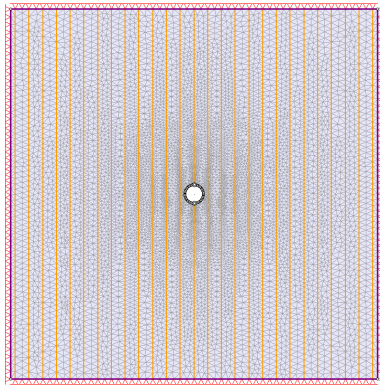


Figura 6-27. Modelo Discontinuo.  $E_1/E_2 = 2$  y  $\lambda = 7,5$  cm.

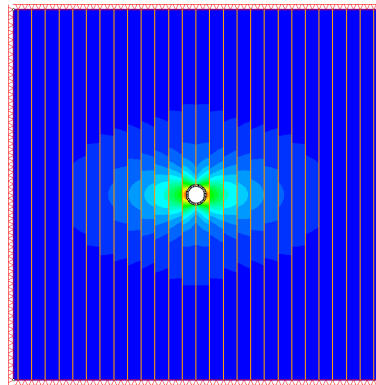
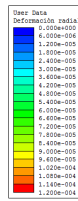
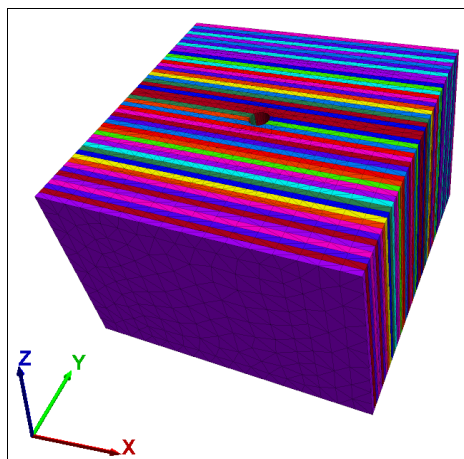
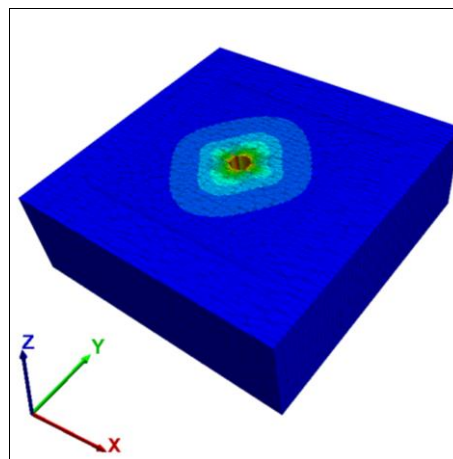


Figura 6-28. Resultados del Modelo Discontinuo.  $E_1/E_2 = 2$  y  $\lambda = 7,5$  cm.

## b) Modelos en 3DEC

- Bloque de  $1,5 \times 1,5 \times 1$  m
- Cavity cilíndrica vertical centrada de radio 0,05 m
- $\nu_1 = \nu_2 = 0,3$
- 1 familia de discontinuidades paralelas y con extremos abiertos
- Buzamiento de las discontinuidades paralelo al eje de la cavity  $\beta = 90^\circ$ .
- Carga radial homogénea de 10 MPa
- Tensiones *in situ* isotrópicas de 5 MPa

En las siguientes figuras puede observarse el modelo utilizado en el cálculo para medio fisurado (Figura 6-29) y una representación de la deformación en el plano horizontal central (Figura 6-30).

Figura 6-29. Modelo Discontinuo.  $\lambda = 0,6R$ . Vista completa.Figura 6-30. Resultado del Modelo Discontinuo.  $\lambda = 0,6R$ . Deformación del plano horizontal  $z = 0,5$  m.

En ambos modelos las propiedades del medio continuo se han calculado según lo propuesto por Barton (1972) y Goodman (1989) y expresado en las ecuaciones 6-18 y 6-20 (véase apartado 6.1.3.4).

Se han supuesto tres casos con diferentes anisotropías (Tabla 6-3 a Tabla 6-5):

- i)  $E_1/E_2 = 3$  y  $G_1/G_2 = 3$
- ii)  $E_1/E_2 = 2$  y  $G_1/G_2 = 2$
- iii)  $E_1/E_2 = 1,33$  y  $G_1/G_2 = 1,33$

Tabla 6-3. Caso i:  $E_1/E_2 = 3$ . Modelos calculados y parámetros utilizados.

$\lambda$ (cm)	$\lambda/R$	$E_1$ (MPa)	$\nu_1$	$G_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$G_2$ (MPa)	$k_n$ (MPa/m)	$k_s$ (MPa/m)
continuo					3333	1282	-	-
0,5	0,1				-	-	1000000	384615
1	0,2				-	-	500000	192308
2	0,4				-	-	250000	96154
3	0,6				-	-	166667	64103
7,5	1,5	10000	0,3	3846	-	-	66667	25641
10	2				-	-	50000	19231
20	4				-	-	25000	9615
37,5	7,5				-	-	13333	5128
50	10				-	-	10000	3846
75	15				-	-	6667	2564
100	20				-	-	5000	1923

Tabla 6-4. Caso ii:  $E_1/E_2 = 2$ . Modelos calculados y parámetros utilizados.

$\lambda$ (cm)	$\lambda/R$	$E_1$ (MPa)	$\nu_1$	$G_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$G_2$ (MPa)	$k_n$ (MPa/m)	$k_s$ (MPa/m)
continuo					5000	1923	-	-
0,5	0,1				-	-	2000000	769231
1	0,2	10000	0,3	3846	-	-	1000000	384615
2	0,4				-	-	500000	192308
3	0,6				-	-	333333	128205

$\lambda$ (cm)	$\lambda/R$	$E_1$ (MPa)	$\nu_1$	$G_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$G_2$ (MPa)	$k_n$ (MPa/m)	$k_s$ (MPa/m)
7,5	1,5				-	-	133333	51282
10	2				-	-	100000	38462
20	4				-	-	50000	19231
37,5	7,5				-	-	26667	10256
50	10				-	-	20000	7692
75	15				-	-	13333	5128
100	20				-	-	10000	3846

 Tabla 6-5. Caso iii:  $E_1/E_2 = 1,33$ . Modelos calculados y parámetros utilizados.

$\lambda$ (cm)	$\lambda/R$	$E_1$ (MPa)	$\nu_1$	$G_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$G_2$ (MPa)	$k_n$ (MPa/m)	$k_s$ (MPa/m)
continuo					7500	2885	-	-
0,5	0,1				-	-	6000000	2307692
1	0,2				-	-	3000000	1153846
2	0,4				-	-	1500000	576923
3	0,6				-	-	1000000	384615
7,5	1,5	10000	0,3	3846	-	-	400000	153846
10	2				-	-	300000	115385
20	4				-	-	150000	57692
37,5	7,5				-	-	80000	30769
50	10				-	-	60000	23077
75	15				-	-	40000	15385
100	20				-	-	30000	11538

### 6.2.2 Influencia de la posición de las discontinuidades

Dadas sus características, un modelo continuo anisótropo no tiene en cuenta la posición de las discontinuidades a la hora de calcular las deformaciones producidas por una determinada carga. Por tanto, este método será válido siempre y cuando la posición específica de una discontinuidad no sea determinante en el problema estudiado.

Este análisis se realizó con el programa Phase<sup>2</sup>. A fin de estudiar la influencia de la posición de las discontinuidades respecto al centro de la cavidad presiométrica se construyeron 8 modelos con diferentes espaciados de discontinuidades en relación al radio ( $\lambda/R_0$ ): 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 1,5; 2; 4 y 10. La relación entre el módulo máximo y el mínimo ( $E_1/E_2$ ), debida a la presencia de discontinuidades, fue de 3.

Para cada uno de los modelos se realizaron cuatro variantes en las que se modificó la posición de las fisuras con respecto al centro de la cavidad. En primer lugar se realizó el cálculo con el origen de las juntas en el punto 0,0 coincidente con el centro de la cavidad. Para los siguientes cálculos las juntas se desplazaron en  $1/6\lambda$ ,  $1/4\lambda$  y  $1/2\lambda$ , según el esquema que se puede ver en la Figura 6-31.

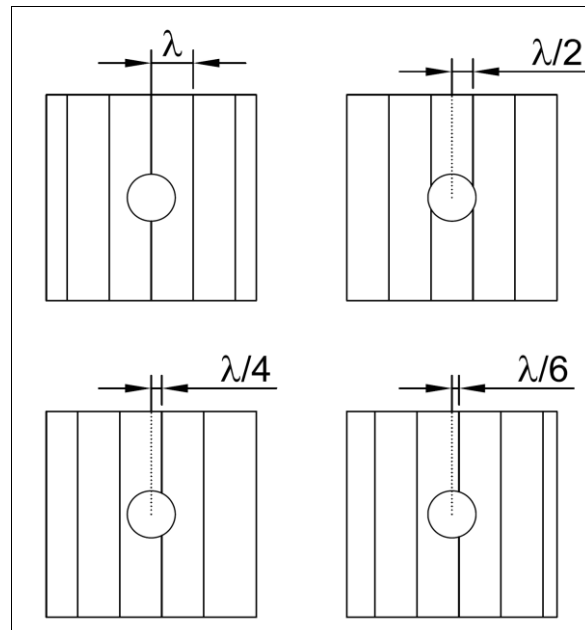


Figura 6-31. Esquema del desplazamiento del origen de la familia de juntas.

### 6.2.2.1 Resultados

Para cada uno de los casos calculados se han medido los desplazamientos radiales ( $\Delta R$ ) en ocho direcciones separadas  $45^\circ$ , correspondiendo las medidas a  $0^\circ$  y  $180^\circ$  a la dirección paralela a las juntas ( $E_1$ ) y las medidas a  $90^\circ$  y  $270^\circ$  a la dirección perpendicular a estas ( $E_2$ ).

En las figuras 6-33 a 6-40 se muestran, de manera gráfica, los desplazamientos radiales ( $\Delta R$ ) obtenidos con las simulaciones realizadas. En cada una de ellas, se han representado los valores obtenidos con la primera discontinuidad centrada en el origen y con desplazamientos de  $1/6\lambda$ ,  $1/4\lambda$  y  $1/2\lambda$  (véase Figura 6-31).

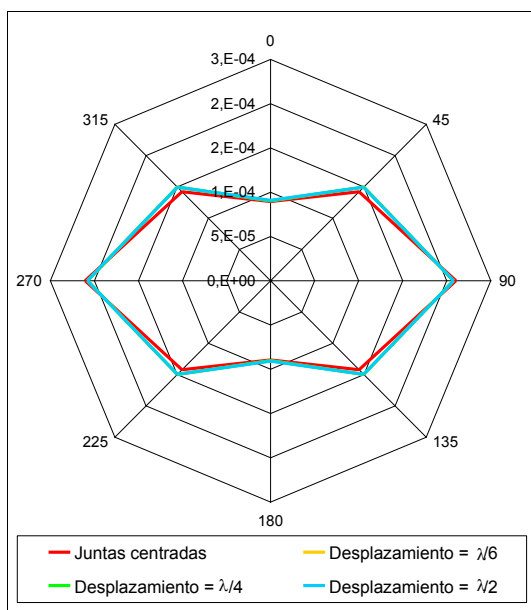


Figura 6-32. Desplazamientos radiales medidos con Phase<sup>2</sup> para un espaciado de  $\lambda=0,1R$ .

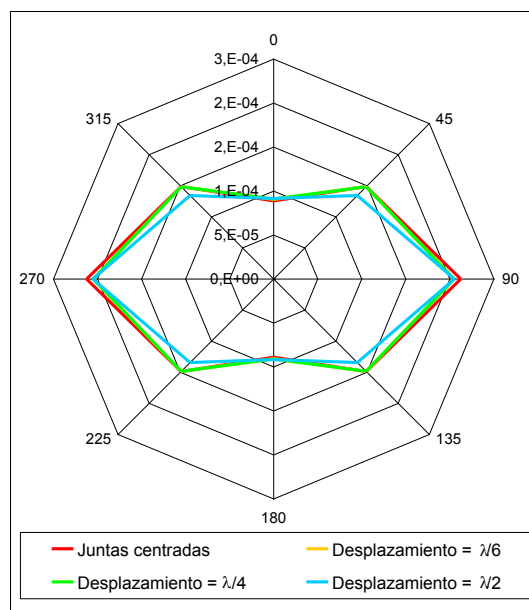
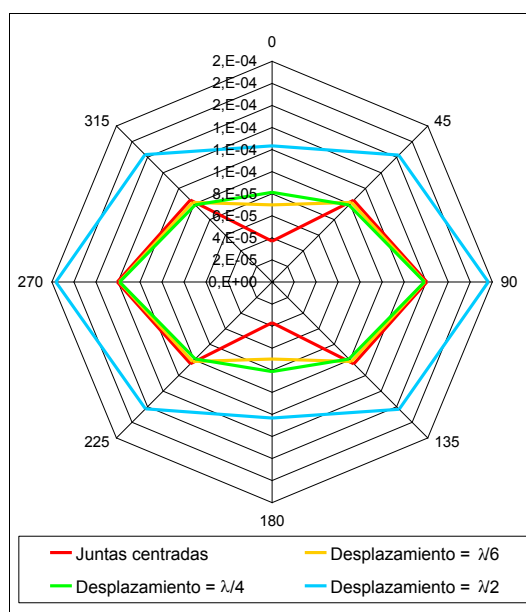
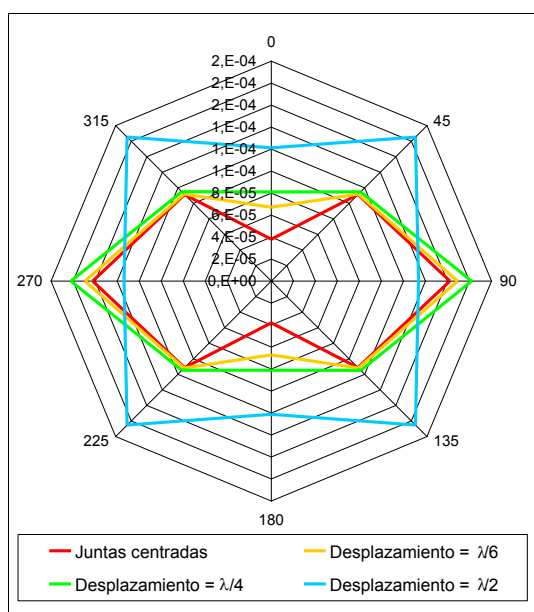
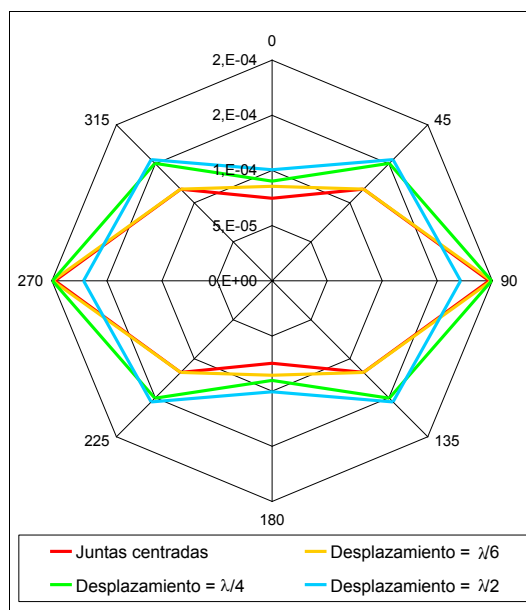
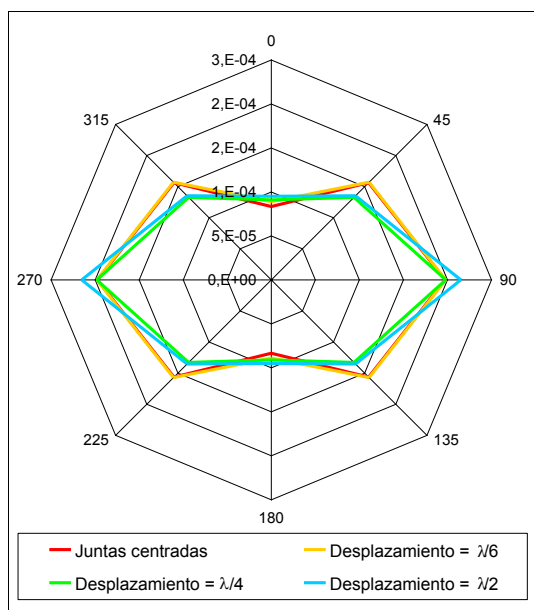


Figura 6-33. Desplazamientos radiales medidos con Phase<sup>2</sup> para un espaciado de  $\lambda=0,2R$ .





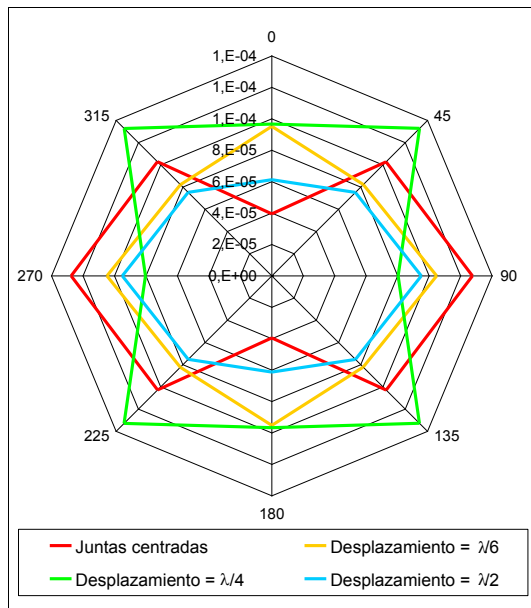


Figura 6-38. Desplazamientos radiales medidos con Phase<sup>2</sup> para un espaciado de  $\lambda=4R$ .

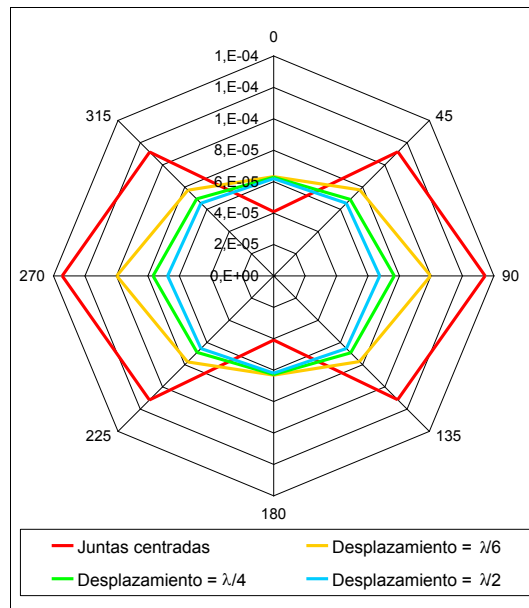


Figura 6-39. Desplazamientos radiales medidos con Phase<sup>2</sup> para un espaciado de  $\lambda=10R$ .

### 6.2.2.2 Análisis

Para analizar la influencia de la posición de las discontinuidades respecto al sondeo, se ha estudiado la variación de los datos de deformación radial medidos para cada origen (véase Figura 6-31). El estudio de la variación de este parámetro se ha realizado mediante la desviación típica de los valores de desplazamiento radial medidos para cada origen.

En la Figura 6-40 se han representado las desviaciones típicas de los valores de deformación radial, medidos en las diferentes orientaciones, en función del espaciado de las discontinuidades. En este gráfico se observa un aumento general de las desviaciones al aumentar el espaciado de las discontinuidades en el modelo.

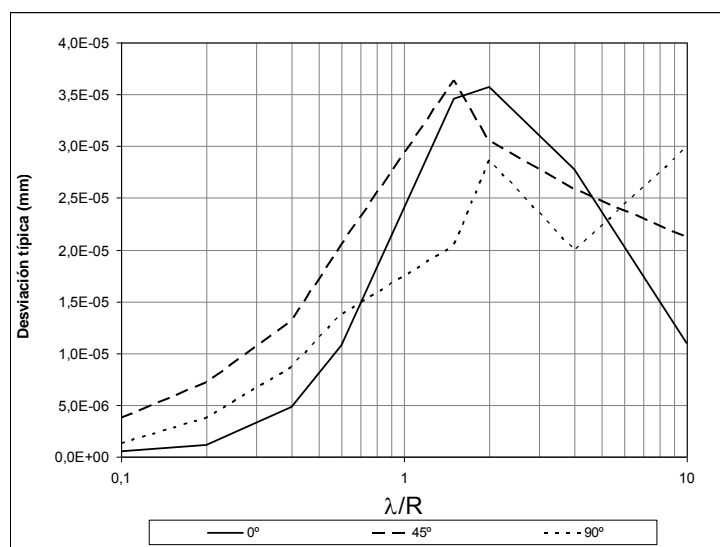


Figura 6-40. Influencia de la posición de las discontinuidades respecto al sondeo en función del espaciado de las mismas para las diferentes direcciones de medida.

A fin de apreciar de manera más clara esta influencia, en la Figura 6-41 se ha representado la suma de las desviaciones típicas calculadas para las diferentes direcciones de medida del desplazamiento radial, en función del espaciado de las discontinuidades del modelo. Se puede observar como la relación es clara, siendo mucho mayor la influencia de la posición de las discontinuidades en los modelos con espaciados altos.

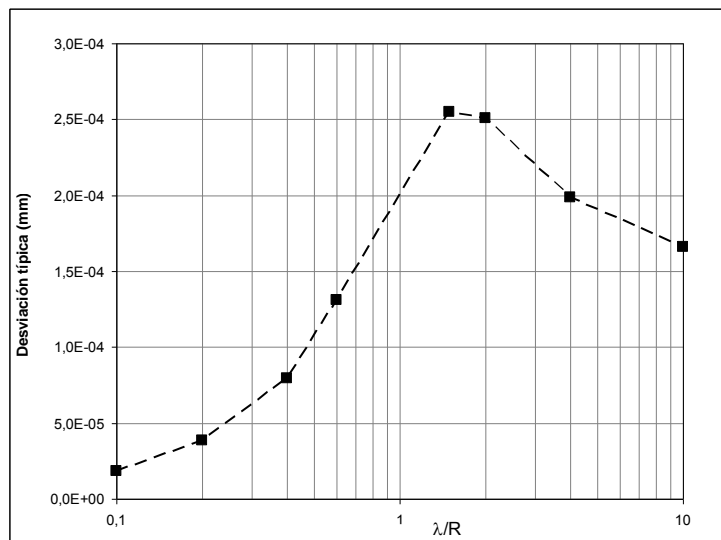


Figura 6-41. Influencia de la posición de las discontinuidades respecto al sondeo en función del espaciado de las mismas.

### 6.2.3 Efecto escala

El efecto escala es uno de los mayores problemas a la hora de afrontar el estudio de un macizo rocoso ya que el volumen mínimo de material necesario para representar el comportamiento del conjunto está en la mayoría de las ocasiones muy por encima de las capacidades de cualquier laboratorio o incluso de los ensayos convencionales de campo. En este estudio se analiza la influencia de la escala en los resultados obtenidos mediante un método continuo comparados con los obtenidos mediante la modelización de las fisuras de manera independiente.

En primer lugar se empleó el programa Phase<sup>2</sup> dada su mayor sencillez y velocidad de cálculo. Mediante esta herramienta se realizaron modelos con tres anisotropías diferentes  $E_1/E_2$  de 3; 2 y 1,33; a fin de estudiar la influencia de este parámetro. Con cada una de estas anisotropías se calcularon un modelo continuo equivalente y once modelos discontinuos con diferentes espaciados de las discontinuidades (0,1R; 0,2R; 0,4R; 0,6R; 1,5R; 2R; 4R; 7,5R; 10R; 15R y 20R).

Para comprobar la coherencia entre los resultados de los análisis en 2D y en 3D, parte de estos modelos se calcularon de igual manera con el programa 3DEC. Debido a la mayor complejidad y tiempo de cálculo, se estudiaron solamente los modelos continuos y cuatro espaciados diferentes (0,6R, 1,5R, 2R y 4R) para cada una de las anisotropías utilizadas anteriormente.

Cada uno de los resultados de deformación obtenidos con los modelos discontinuos se comparó con el obtenido con su respectivo modelo continuo.

### 6.2.3.1 Resultados

Se han medido los desplazamientos radiales en ocho direcciones separadas  $45^\circ$ , correspondiendo las medidas a  $0^\circ$  y  $180^\circ$  a la dirección paralela a las juntas ( $E_1$ ) y las medidas a  $90^\circ$  y  $270^\circ$  a la dirección perpendicular a estas ( $E_2$ ), para el caso de  $E_1/E_2$  (Figura 6-42),  $E_1/E_2 = 2$  (Figura 6-43) y  $E_1/E_2 = 1,33$  (Figura 6-44).

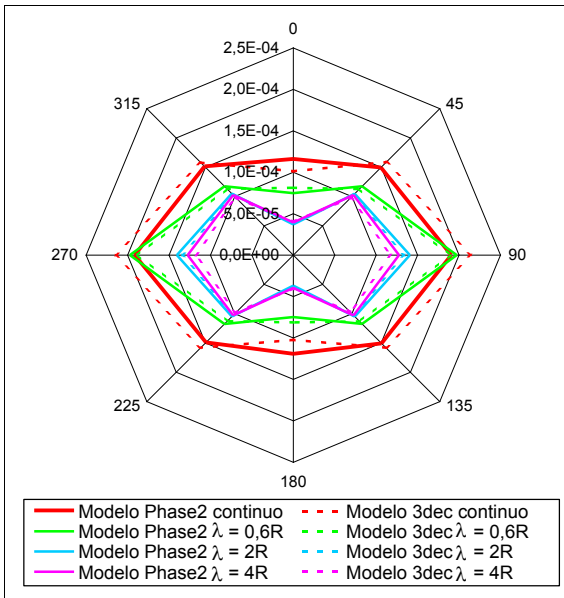


Figura 6-42. Desplazamientos radiales para los casos con  $E_1/E_2 = 3$ .

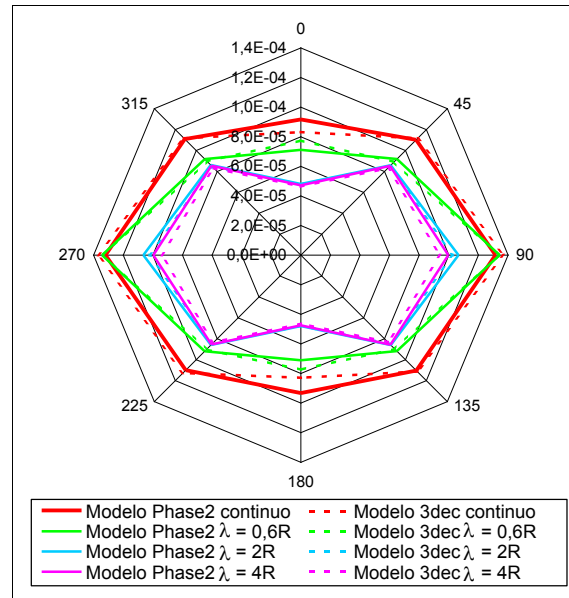


Figura 6-43. Desplazamientos radiales para los casos con  $E_1/E_2 = 2$ .

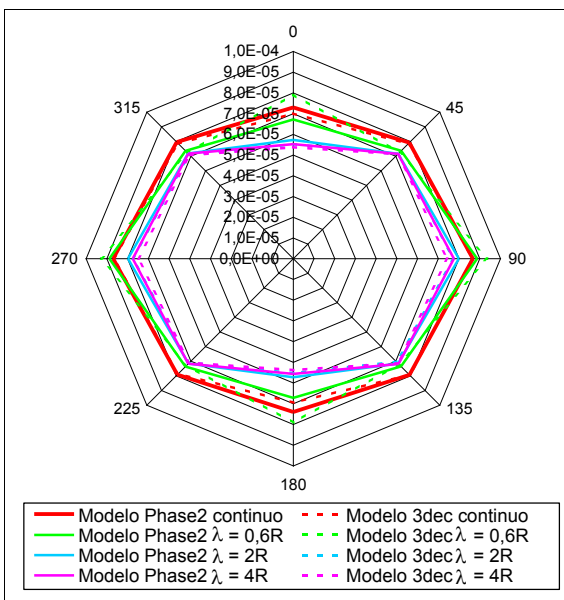


Figura 6-44. Desplazamientos radiales para los casos con  $E_1/E_2 = 1,33$ .

### 6.2.3.2 Análisis

A partir de los datos de deformación radial se han comparado, para cada uno de los espaciados y para cada uno de los ratios de anisotropía, los errores promedio y máximo cometidos al utilizar el método continuo respecto a los datos obtenidos por la modelización de macizo fisurado.

El error promedio se ha calculado mediante la siguiente expresión:

$$\text{Error Promedio} = \frac{\sum \frac{|\Delta R - \Delta R'|}{\Delta R}}{n} \cdot 100 \quad (6-54)$$

siendo

$\Delta R$  el desplazamiento radial medido en el modelo fisurado

$\Delta R'$  el desplazamiento radial medido en el modelo continuo anisótropo  
n el número de medidas (en este caso ocho direcciones diferentes)

A la vista de los datos calculados (Figura 6-45), se observa una clara influencia del efecto escala en los resultados, siendo la diferencia entre el modelo continuo y el discontinuo dependiente del espaciado de las discontinuidades. En cuanto al grado de anisotropía ( $E_1/E_2$ ), se observa una relación directa entre este y la diferencia entre los dos tipos de modelos. La diferencia entre el modelo discontinuo y el continuo equivalente es mayor cuanto mayor es la anisotropía.

Los resultados obtenidos con el modelo 2D (Phase<sup>2</sup>) y con el modelo 3D (3DEC) son coherentes entre sí, reforzando así la validez de la interpretación de los datos.

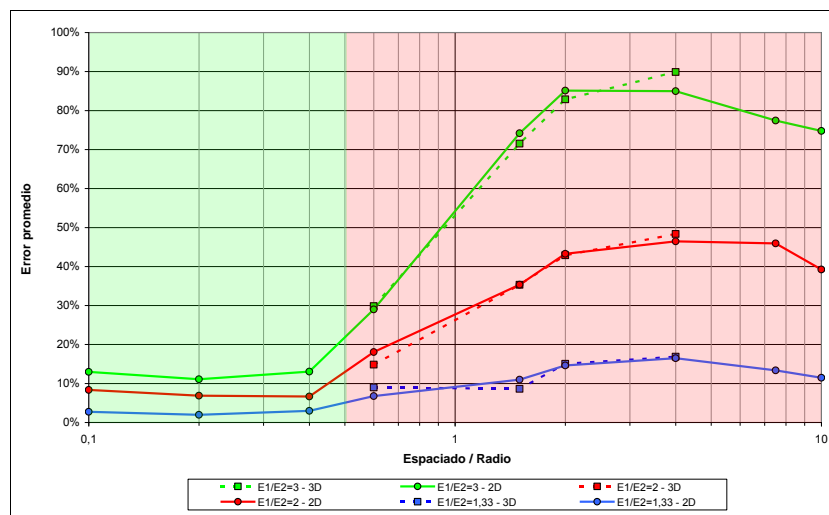


Figura 6-45. Errores promedio y máximo cometidos con el modelo continuo anisótropo respecto al modelo discontinuo equivalente.

### 6.2.4 Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos pueden extraerse varias conclusiones:

- Existen varios métodos para modelizar un macizo rocoso con anisotropía por fisuración.
- La modelización basada en un modelo continuo anisótropo equivalente es más sencilla de utilizar y requiere de menos recursos de cálculo.
- Sin embargo, la posición de las discontinuidades respecto al centro del sondeo, que no puede ser considerada en un modelo continuo, tiene una gran influencia en los datos calculados, siendo esta influencia mayor cuanto mayor es el espaciado.
- Además, la diferencia entre las deformaciones calculadas con el modelo continuo y con el discontinuo está influenciada por el efecto escala.
- En el análisis de un ensayo de expansión de cavidad cilíndrica, la influencia del espaciado de las discontinuidades en la precisión de los dos métodos es clara. Por tanto, la elección del modelo debe hacerse teniendo en cuenta la relación entre el radio de la cavidad y el espaciado (Tabla 6-6).
- Para espaciados bajos ( $\lambda/R \leq 0,4$ ) la influencia de la posición de las discontinuidades es pequeña y los valores de deformación radial calculados con ambos modelos son semejantes, por lo que los dos modelos pueden ser usados indistintamente.
- Para espaciados con ( $\lambda/R > 1$ ) la influencia excesiva de la posición de las discontinuidades en el modelo discontinuo y el error cometido al usar el modelo continuo es muy grande. Por tanto, el modelo anisótropo continuo equivalente no debería de ser utilizado para cálculos que requieran de precisión en la estimación de deformaciones y a la hora de utilizar un modelo discontinuo debería tenerse en cuenta la posición de las juntas.
- A mayor grado de anisotropía, la diferencia observada entre los dos métodos de modelización es mayor. Para el caso de  $E_1/E_2 = 3$  las diferencias son importantes incluso para espaciados bajos.
- La gran influencia de la escala en los valores observados hace que, en la interpretación de ensayos realizados en cavidades de pequeño diámetro como pueden ser los ensayos dilatómétricos, deba de evitarse el modelo continuo que, sin embargo, puede ser útil a la hora de interpretar ensayos de mayor escala como los gatos radiales en galería o las cámaras de presión así como en la deformación elástica de túneles.

Tabla 6-6. Métodos recomendables en la modelización de ensayos de expansión cilíndrica en medios fisurados en función de  $\lambda/R$ .

$\lambda/R$	Modelos aplicables	Modelo recomendado
$\leq 0,4$	Continuo y discontinuo	Continuo
$> 0,4$	Discontinuo	Discontinuo

### 6.3 Modelo elegido

Como se ha visto en el apartado 6.2.4, la relación entre el espaciado de la discontinuidad y el radio de la cavidad es uno de los principales factores a tener en cuenta para la elección del modelo a emplear.

Los ensayos presiométricos suelen realizarse con diámetros de perforación de entre 44 y 101 mm. Con estos valores y teniendo en cuenta la relación  $\lambda/R=0,4$  como límite para la utilización del modelo continuo, este solo debería emplearse con espaciados de juntas menores a 20 mm.

El espaciado que muestran las discontinuidades de los materiales a estudiar en la zona del estrecho de Gibraltar es mayor a estos valores y por tanto se utilizará el modelo discontinuo en la modelización de los mismos.

Dado que el buzamiento de los planos de discontinuidad en esta zona varía, de un punto a otro, desde  $0^\circ$  a  $90^\circ$  y que el análisis pretende abarcar todo el rango posible, se empleará un modelo tridimensional que pueda tener en cuenta las diferentes orientaciones posibles entre el sondeo y las discontinuidades.

El software a emplear será el 3DEC en su versión 4.11.066 diseñado por Itasca (2011). Este software utiliza elementos discontinuos y diferencias finitas.

El modelo realizado consiste en un bloque cuadrado de  $2 \times 2 \times 3$  m. En este bloque se realizará una cavidad cilíndrica vertical de 50 mm de radio cuyo eje coincidirá con la longitud mayor del bloque y estará centrado en las caras superior e inferior (Figura 6-46 y Figura 6-47). Estas dimensiones aseguran una influencia nula de los bordes del bloque en las deformaciones medidas.

La sonda presiométrica se ha simulado mediante la aplicación de una tensión radial en el tramo central de la cavidad cilíndrica. El tramo en carga es de 0,5 m (longitud habitual de muchas sondas existentes) lo que permite la interpretación del ensayo como la expansión de una cavidad cilíndrica infinita. Esta interpretación puede asumirse si la relación longitud/diámetro de la sonda es  $L/D > 6,0$  a  $6,5$  (Briaud, 1992; Mecsi, 2013).

Las discontinuidades se han modelizado según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, sin dilatación. Según las características observadas en los afloramientos existentes, las discontinuidades presentan una gran continuidad, suficiente como para afectar a todo el bloque modelo.

Los bloques de roca matriz se han simulado como un material homogéneo elástico lineal. Dadas las propiedades geotécnicas de los materiales no se esperan importantes deformaciones por la plastificación de la roca matriz y, por tanto, el modelo elástico puede ser empleado de manera que se disminuyen de manera importante los tiempos de cálculo sin empobrecer los resultados obtenidos.

Un ejemplo del programa de cálculo empleado para simular un ensayo presiométrico se ha recogido en el Apéndice V.

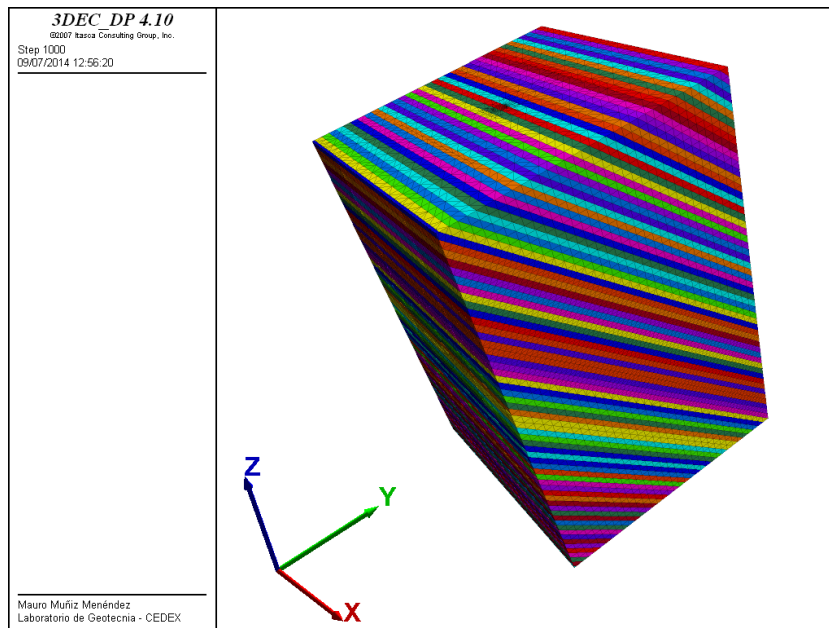


Figura 6-46. Ejemplo del modelo utilizado con un buzamiento de las juntas de 45°.

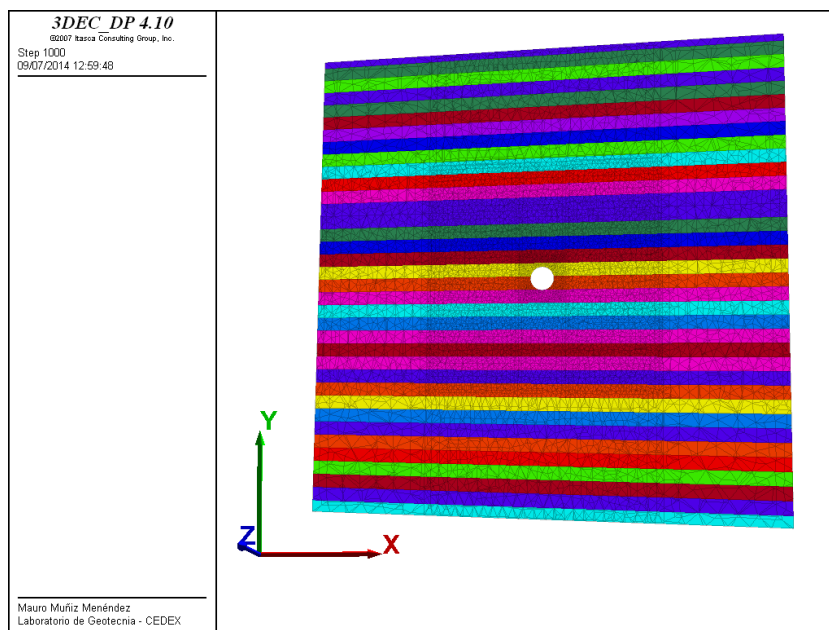


Figura 6-47. Corte transversal del modelo presentado en la Figura 6-46.

### 6.3.1 Parámetros de entrada

En los apartados siguientes se presenta y justifica la elección de cada uno de los parámetros geotécnicos, tanto de la roca matriz como de las discontinuidades, que se han introducido en el modelo. Para ello se ha seleccionado los materiales arcillosos de la Unidad Algeciras, por ser una de las unidades mejor caracterizada y disponer de un mayor número de datos fiables (véase apartado 2.6, 4 y 5.2.1)

### 6.3.1.1 *Parámetros deformacionales de la roca matriz*

Según los datos analizados para los materiales de la Unidad Algeciras (véase apartado 5.2.1.3.), el módulo de deformación de la roca matriz presenta unos valores medios de 3600 a 5200 MPa. En el modelo se ha adoptado un valor intermedio de 4500 MPa.

En el mismo apartado se analizan los datos correspondientes al coeficiente de Poisson de estos materiales. Los valores presentan una gran variabilidad dentro de todo el rango posible (0 a 0,5) con un valor medio de 0,28. Este valor será el empleado en la simulación.

### 6.3.1.2 *Espaciado de las discontinuidades*

En base a las descripciones de los sondeos, la observación de afloramientos y muestras se ha determinado un espaciado medio de las discontinuidades, para estos materiales, de aproximadamente 4 cm.

### 6.3.1.3 *Rigidez normal de las discontinuidades*

Este parámetro se ha estimado a partir de la ecuación 6-18 (véase apartado 6.1.3.2), suponiendo 4500 MPa como módulo de deformación de la roca matriz ( $E_i$ ), un espaciado ( $\lambda$ ) de 0,04 m y suponiendo un módulo de deformación del macizo rocoso en dirección perpendicular a las capas ( $E_c$ ) de 0,3 veces el módulo de la roca matriz (1384 MPa).

$$k_n = \frac{E_c \cdot E_i}{\lambda(E_i - E_c)} = \frac{4500 \text{ MPa} \cdot 1384 \text{ MPa}}{0,04 \text{ m} \cdot (4500 \text{ MPa} - 1384 \text{ MPa})} \approx 50.000 \text{ MPa/m}$$

Por tanto, la rigidez normal de las discontinuidades ( $k_n$ ) se tomó como de 50.000 MPa/m.

### 6.3.1.4 *Rigidez tangencial de las discontinuidades*

Los datos analizados se han obtenido en base a ensayos realizados con muestras de la Galería de Tarifa, recogidos en el apartado 4.3.4.2. En vista de estos resultados se ha tomado un valor de 800 MPa/m para la rigidez tangencial ( $k_s$ ) que se introducirá en el modelo.

### 6.3.1.5 *Resistencia de las discontinuidades*

Con los mismos ensayos utilizados en el apartado anterior se han obtenido los siguientes parámetros de entrada en el modelo para la resistencia de las juntas.

$$\phi = 18^\circ \text{ y } c = 0,4 \text{ MPa}$$

### 6.3.1.6 *Tensiones de confinamiento*

Las tensiones naturales existentes en la zona de estudio a las cotas a las que se pretende excavar el túnel no han sido medidas. En diferentes estudios realizados a lo largo de estos años se han realizado diferentes suposiciones y estimaciones sobre la magnitud y la orientación de dichas tensiones.



La orientación de las tensiones principales, al menos a gran escala, no parece tener influencia orográfica ni tectónica a las profundidades consideradas y, por tanto, puede suponerse que una de las tensiones principales tendrá dirección vertical.

Según los datos recogidos en diferentes estudios, la tensión horizontal mayor tendría una orientación NNO/SSE (Pedrera *et al.*, 2011), si bien el régimen tensional varía de unos datos a otros (Heidbach *et al.*, 2008), pudiendo indicar que al menos la tensión vertical y la tensión horizontal mayor presentan magnitudes similares.

En el trabajo de Martín Ruíz (1998) se supone que gran parte de los materiales que forman la zona de estudio se encuentran en condiciones plásticas, no resistiendo por tanto esfuerzos de corte y generando por tanto un estado de esfuerzos litostático con  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ . La hipótesis de un régimen de esfuerzos litostático es utilizada también por los modelos de esta zona realizados por otros autores como Eisenstein (1994).

No habiendo más datos, se ha tomado como válida esta última hipótesis y, por tanto, las tensiones de confinamiento que se han dado al modelo son isotropas. La magnitud de las mismas se ha estimado a partir de los perfiles del proyecto.

Se ha supuesto una profundidad media del fondo marino de 200 m, una profundidad respecto al fondo de otros 200 m y un peso específico del agua del mar de  $10 \text{ kN/m}^3$ .

$$\sigma_v = \sum (z_i \cdot \gamma_i) = 250 \text{ m} \cdot 10 \text{ kN/m}^3 + 200 \text{ m} \cdot 24 \text{ kN/m}^3 = 7 \text{ MPa}$$

$$u = z_w \cdot \gamma_w = (250 \text{ m} + 200 \text{ m}) \cdot 10 \text{ kN/m}^3 = 4,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma' = \sigma - u = 7 \text{ MPa} - 4,5 \text{ MPa} = 3 \text{ MPa}$$

Por tanto, al modelo se le ha dado un confinamiento isotrópico de 3 MPa, un valor cercano al propuesto por Panciera *et al.* (2010).

#### 6.3.1.7 Resumen de parámetros adoptados para el modelo

$$E_i = 4500 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,28$$

$$\lambda = 0,04 \text{ m}$$

$$k_n = 50.000 \text{ MPa/m}$$

$$k_s = 800 \text{ MPa/m}$$

$$c_j = 0,4 \text{ MPa}$$

$$\phi_j = 18^\circ$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 3 \text{ MPa}$$

## 6.4 Resultados

Con el modelo presentado anteriormente, se han simulado ensayos presiométricos con diez diferentes buzamientos de las capas (entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ).

El diámetro de sondeo modelizado fue de 0,05 m y la medida de la deformación (en régimen elástico) se tomó a 10 MPa. Se midió el desplazamiento radial en 24 puntos situados en el

centro de la zona deformada y separados  $15^\circ$ , si bien estos se analizaron suponiendo 12 medidas diametrales y no 24 radiales.

La Figura 6-48 y la Figura 6-49 muestran dos ejemplos del modelo de cálculo. En el primer caso se trata del modelo con  $\beta=30^\circ$  y en el segundo con  $\beta=80^\circ$ .

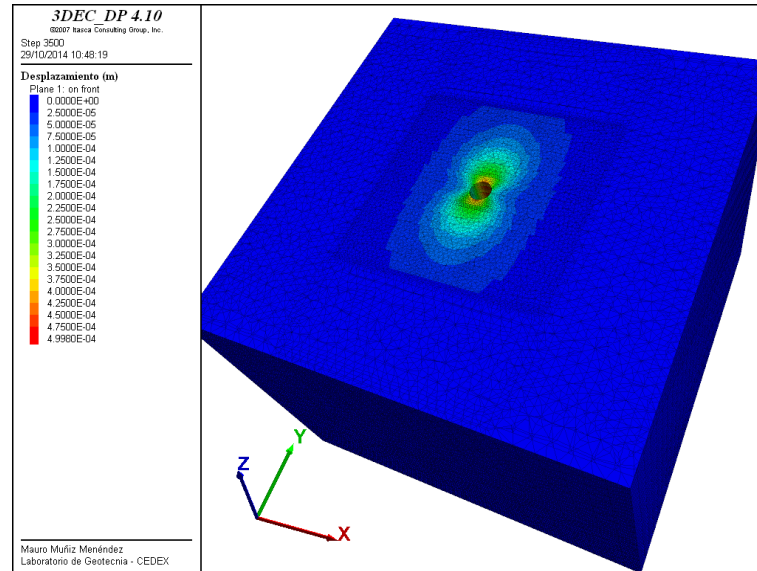


Figura 6-48. Modelo 3DEC deformado con  $\beta=30^\circ$ . Corte horizontal por el centro de la zona ensayada.

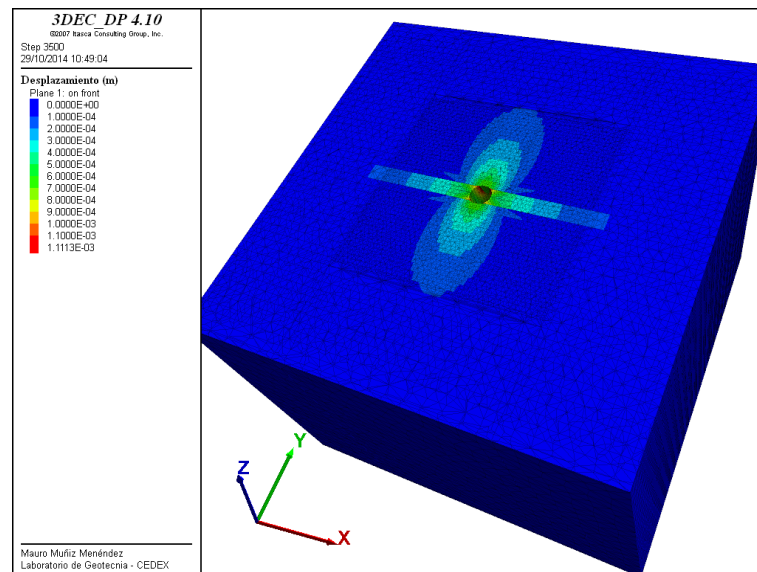


Figura 6-49. Modelo 3DEC deformado con  $\beta=80^\circ$ . Corte horizontal por el centro de la zona ensayada.

Además de los cálculos realizados con el modelo presentado en el apartado 6.3, se han realizado cálculos con diferentes variaciones de los parámetros geotécnicos ( $E_i$ ,  $\nu$ ,  $k_n$ ,  $k_s$  y  $\lambda$ ) a fin de poder observar el comportamiento del modelo y determinar la validez de la interpretación en otros materiales. Los resultados de todos estos ensayos se recogen en el Apéndice VI. En la Figura 6-50 a Figura 6-54 se recogen algunos de estos ensayos en los que se aprecia la influencia de los diferentes parámetros.

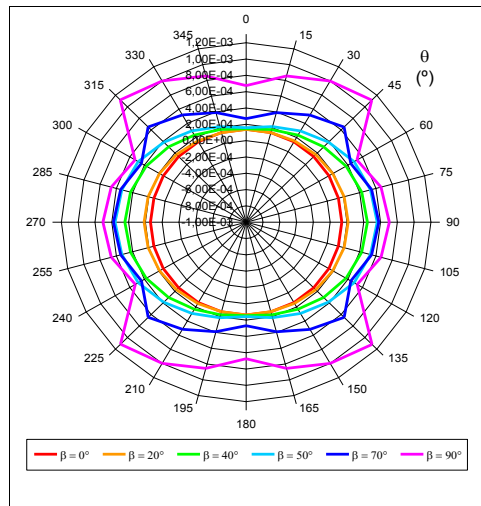


Figura 6-50. Influencia del buzamiento en la deformación para una carga radial de 10 MPa.

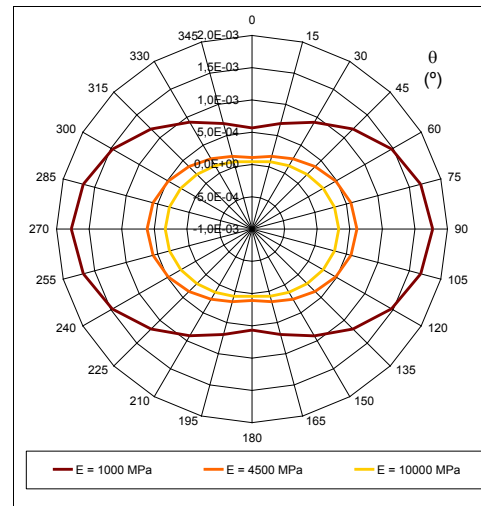


Figura 6-51. Influencia del  $E_i$  en la deformación para una carga radial de 10 MPa.

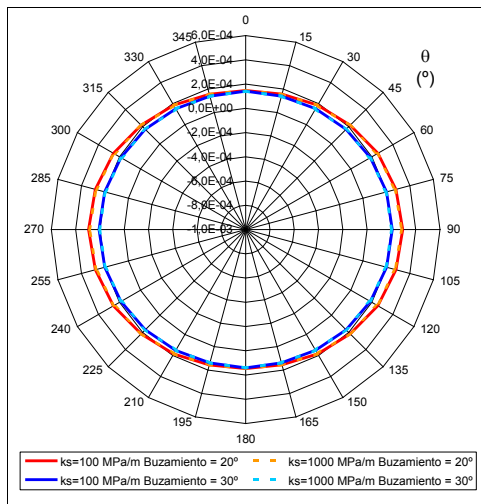


Figura 6-52. Influencia del  $k_s$  en la deformación para una carga radial de 10 MPa.

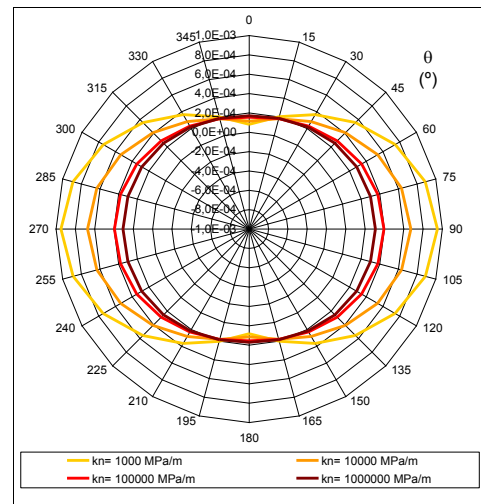


Figura 6-53. Influencia del  $k_n$  en la deformación para una carga radial de 10 MPa.

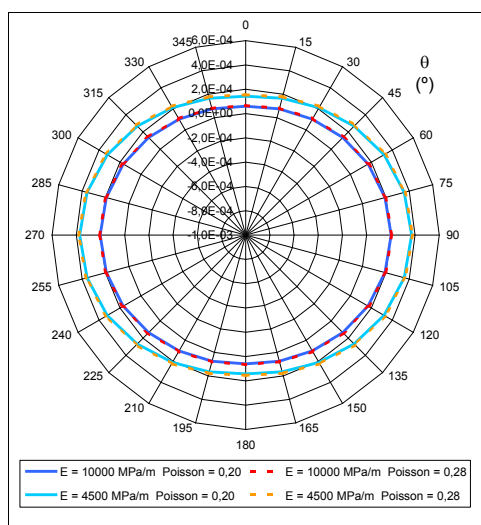


Figura 6-54. Influencia del  $\nu$  en la deformación para una carga radial de 10 MPa.

## 6.5 Análisis

A la vista de los resultados se puede observar como existe un ángulo de buzamiento límite a partir del cual existe un “deslizamiento” relativo de los diferentes bloques que produce un “salto” en la curva “deformación-ángulo  $\theta$ ”. Este ángulo de buzamiento crítico ( $\chi$ ) depende de la relación  $\lambda/R_0$  según la siguiente expresión:

$$\chi = \arcsin\left(\frac{\lambda}{R_0}\right) \quad (6-55)$$

siendo:

$\chi$  el ángulo de buzamiento crítico

$\lambda$  el espaciado de las discontinuidades

$R_0$  el radio de la cavidad cilíndrica

Este ángulo  $\chi$  se corresponde con aquél buzamiento a partir del cual el espaciado aparente en el plano de medida es mayor al radio del sondeo. En este caso las tensiones radiales se transmiten, en la zona central del ensayo, a una o varias capas de tal manera que estas puedan deslizarse respecto a las adyacentes. Este fenómeno se explica de manera gráfica en la Figura 6-55.

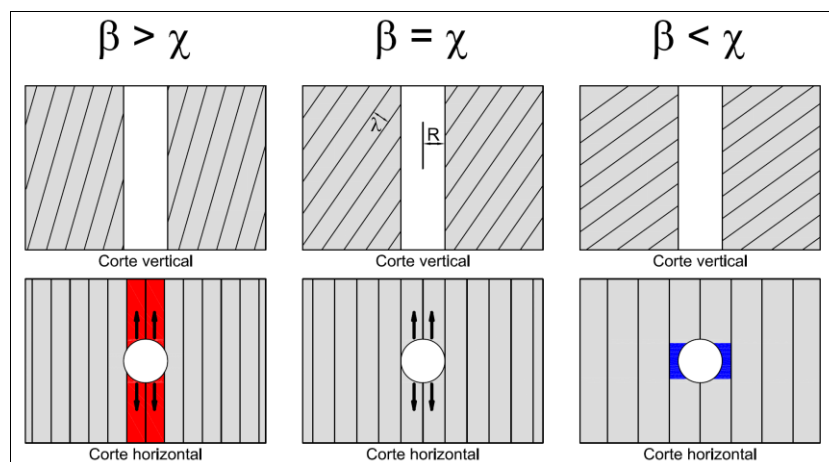


Figura 6-55. Diferencias de comportamiento de una cavidad cilíndrica en medio fisurado en función de la relación  $\beta$ - $\chi$ .

Para buzamientos superiores a  $\chi$ , las tensiones en el plano central del ensayo se transmiten paralelas a la dirección de las capas, afectando a una o varias capas (marcadas en color rojo en la Figura 6-55) que, al no tener continuidad entre ambos lados del sondeo, pueden deslizarse libremente respecto a las capas adyacentes. En cambio, para buzamientos inferiores a  $\chi$ , estas capas presentan una continuidad a ambos lados del sondeo (zona marcada en azul en la Figura 6-55) que impide el deslizamiento de las mismas.

Con los parámetros recogidos en el apartado 6.3.1, en el modelo utilizado se obtendría un ángulo  $\chi$  de  $53^\circ$ . En base a este ángulo se definen dos tipos de comportamientos: deformación

con  $\beta < \chi$  y deformación con  $\beta > \chi$ . Teniendo en cuenta estos comportamientos, a continuación se tratará de obtener expresiones empíricas que permitan explicar el modelo obtenido.

### 6.5.1 Deformación con $\beta < \chi$

Para buzamientos menores a  $\chi$  la curva “desplazamiento radial-ángulo  $\theta$ ” es continua. En esta tesis se ha obtenido la siguiente expresión que permite aproximar esta curva:

$$\Delta R_{\theta} = \Delta R_{0^{\circ}} \cdot \left( 1 + \sin^2 \beta \cdot \sin^2 \theta \cdot \sin \chi \cdot (1 + 2\nu) \cdot \Gamma \right) \quad (6-56)$$

siendo:

$$\Delta R_{0^{\circ}} = (1 + \nu) R_0 \frac{\Delta P}{E_{0^{\circ}}} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\beta - \chi/2}{150} \right) \right] \quad (6-57)$$

$$\Gamma = \frac{E_{0^{\circ}}}{E_{90^{\circ}}} \quad (6-58)$$

En el análisis de los datos de deformación en la dirección paralela a las discontinuidades ( $\Delta R_{0^{\circ}}$ ) se ha observado que ésta es mayor que la teórica propuesta por la mayoría de los autores (Kawamoto, 1966):

$$\Delta R_{0^{\circ} \text{teórico}} = (1 + \nu) R_0 \frac{\Delta P}{E_i} \quad (6-59)$$

De la Figura 6-56 a la Figura 6-61 se puede ver la comparación entre los cálculos del modelo 3DEC y la aproximación empírica para  $\beta < \chi$ .

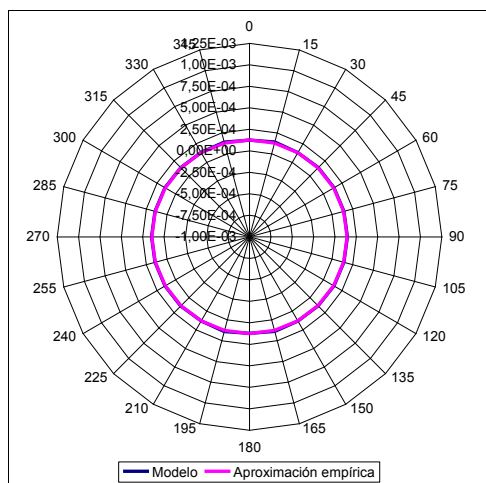


Figura 6-56. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para  $\beta=10^\circ$

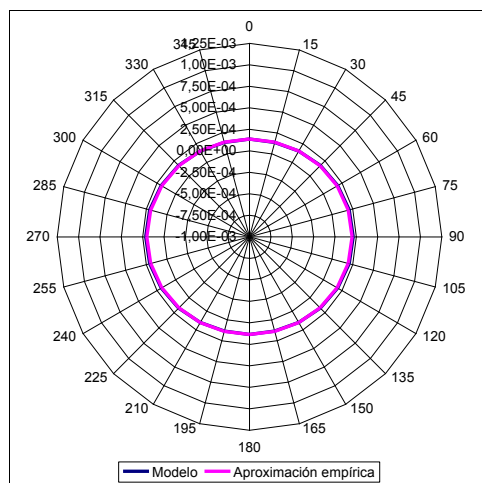


Figura 6-57. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para  $\beta=20^\circ$

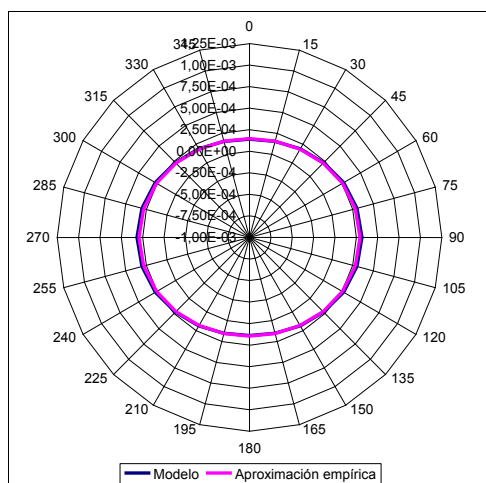


Figura 6-58. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para  $\beta=30^\circ$

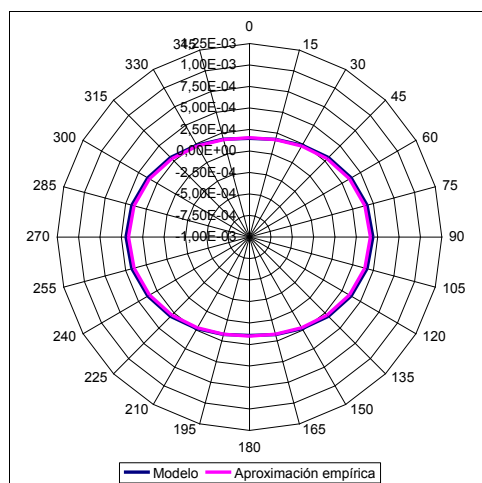


Figura 6-59. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para  $\beta=40^\circ$

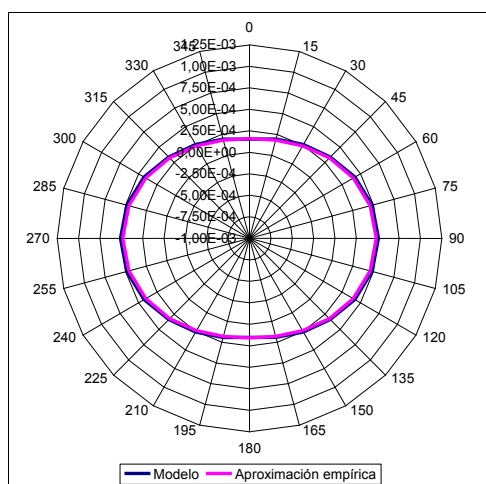


Figura 6-60. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para  $\beta=45^\circ$

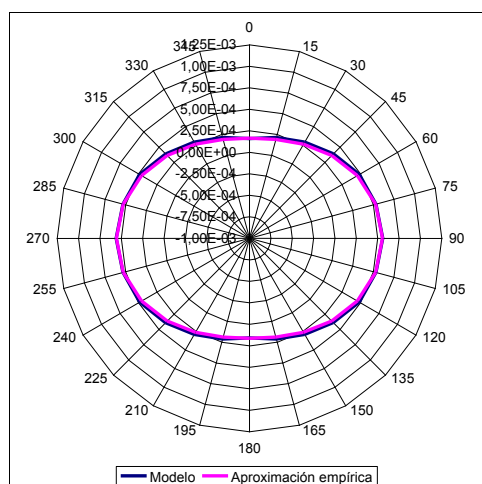


Figura 6-61. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para  $\beta=50^\circ$

### 6.5.2 Deformación con $\beta > \chi$

Para buzamientos mayores a  $\chi$  se produce un deslizamiento relativo de los bloques produciéndose un “salto” en la curva “desplazamiento radial-ángulo  $\theta$ ” (Figura 6-62). Este “salto” se produce en un ángulo  $\chi/\sin(\beta)$  respecto a la dirección de las capas.

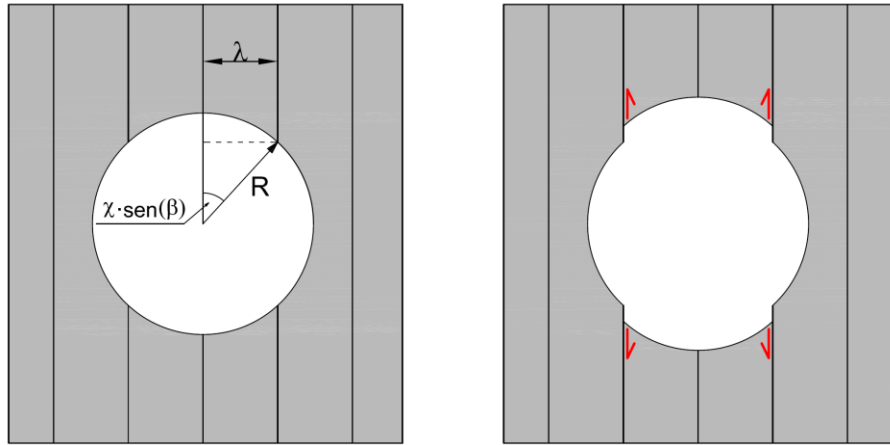


Figura 6-62. Comportamiento de una cavidad cilíndrica en medio fisurado sometida a una carga radial para buzamientos mayores a  $\chi$ . Vista paralela al eje de la cavidad.

En la Figura 6-63 puede verse, como ejemplo de este fenómeno, la curva “desplazamiento radial-ángulo  $\theta$ ” de un modelo calculado con Phase<sup>2</sup> para un buzamiento de  $90^\circ$ , en un ensayo con  $\chi=45^\circ$ .

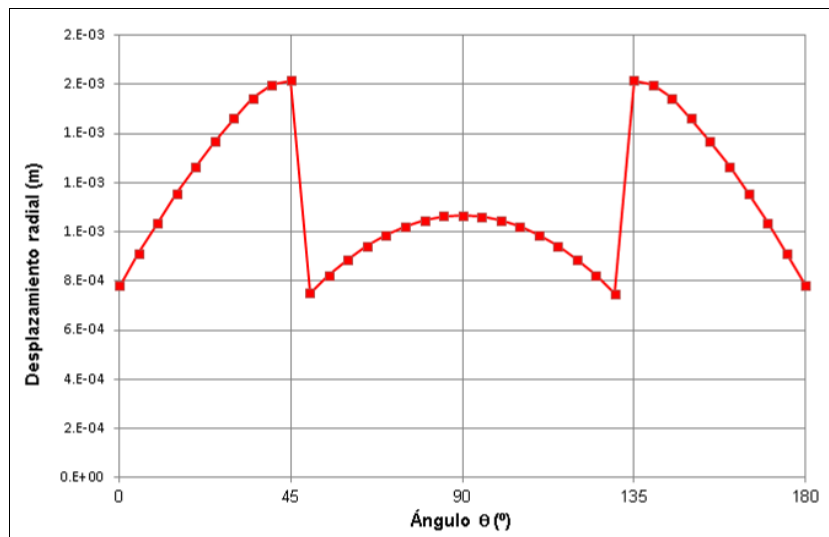


Figura 6-63. Curva “desplazamiento radial-ángulo  $\theta$ ” de un modelo Phase<sup>2</sup> con  $\beta=90^\circ$  en el que se aprecia una discontinuidad en la curva a  $45^\circ$  coincidiendo con el ángulo  $\chi$  ( $E_i=5.000$  MPa;  $\nu=0,3$ ;  $k_n=100.000$  MPa/m;  $k_s=5.000$  MPa/m;  $\Delta P=10$  MPa).

La pendiente de la curva “desplazamiento radial –  $\sin^2\theta$ ”, entre  $0^\circ$  y  $\chi/\sin(\beta)$ , y entre  $\chi/\sin(\beta)$  y  $90^\circ$  es igual que para el caso de  $\beta < \chi$ . Por tanto, para adaptar la aproximación utilizada en el caso de  $\beta < \chi$ , solamente es necesario realizar las siguientes modificaciones:

- Para ángulos  $\chi/\text{sen}(\beta) < \theta \leq 90^\circ$

Para casos con  $\beta > \chi$  se observa que las deformaciones medidas son menores que las medidas en el caso de  $\beta < \chi$ , si bien esta disminución de la deformación ( $\Delta R'$ ) puede suponerse constante con  $\theta$ . Por tanto, los desplazamientos radiales podrán aproximarse con la siguiente modificación de la ecuación 6-56.

$$\Delta R_\theta = \Delta R_{0^\circ} \left( 1 + \sin^2 \beta \cdot \sin^2 \theta \cdot \sin \chi \cdot (1 + 2\nu) \cdot \Gamma \right) - \Delta R' \quad (6-60)$$

Siendo para este modelo:

$$\Delta R' = \Delta R_{0^\circ} \left[ \sin \chi \cdot \sin \beta \left( \frac{k_s}{4000 \text{ MPa/m}} + 1,66 \right) \right] \quad (6-61)$$

- “Salto” producido en  $\theta = \chi/\text{sen}(\beta)$

Como se ha comentado con anterioridad, en  $\theta = \chi$  se produce un salto en la curva “desplazamiento radial – ángulo  $\theta$ ”, debido al deslizamiento de las capas centrales respecto a las adyacentes. Este “salto” ( $\Delta R_\chi$ ) puede cuantificarse según la siguiente expresión ajustada para este modelo:

$$\Delta R_\chi = \Delta R_{0^\circ} \left[ 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \lambda \cdot (\beta - 45^\circ) \cdot \frac{11.250 \text{ MPa/m} - k_s}{12.500 \text{ MPa/m}} \right] \quad (6-62)$$

- Para ángulos  $\chi/\text{sen}(\beta) > \theta \geq 0^\circ$

En estos casos bastará con corregir el desplazamiento calculado con la expresión 6-60 añadiendo la deformación producida en el salto ( $\Delta R_\chi$ ).

$$\Delta R_\theta = \Delta R_{0^\circ} \left( 1 + \sin^2 \beta \cdot \sin^2 \theta \cdot \sin \chi \cdot (1 + 2\nu) \cdot \Gamma \right) - \Delta R' + \Delta R_\chi \quad (6-63)$$

En las figuras 6-65 a 6-68 se puede ver la comparación entre los cálculos del modelo 3DEC y la aproximación empírica para  $\beta > \chi/\text{sen}(\beta)$ .



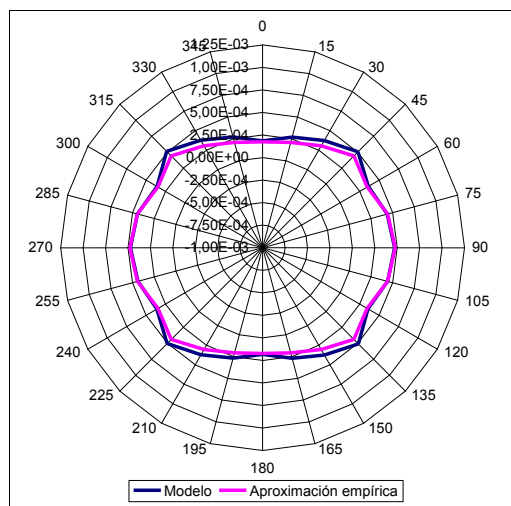


Figura 6-64. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para  $\beta=60^\circ$

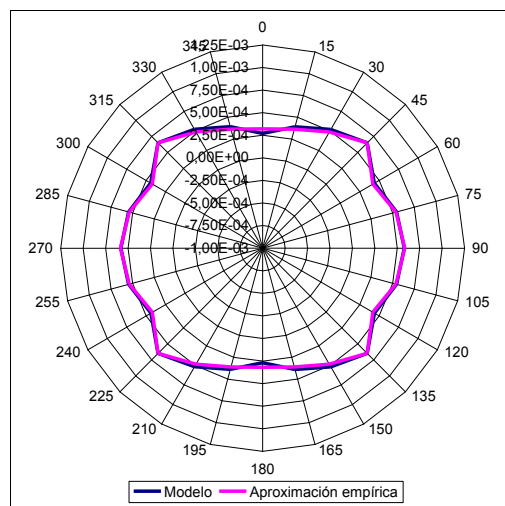


Figura 6-65. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para  $\beta=70^\circ$

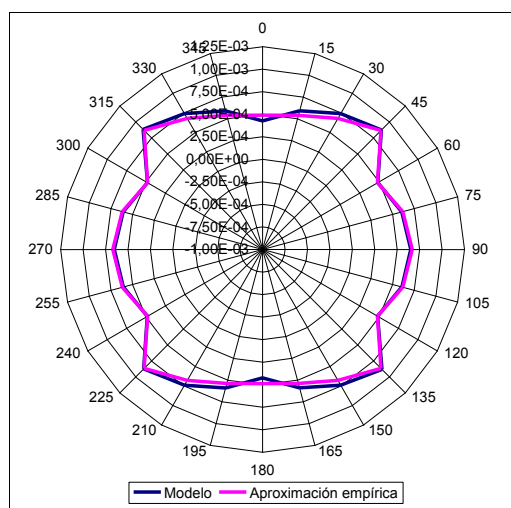


Figura 6-66. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para  $\beta=80^\circ$

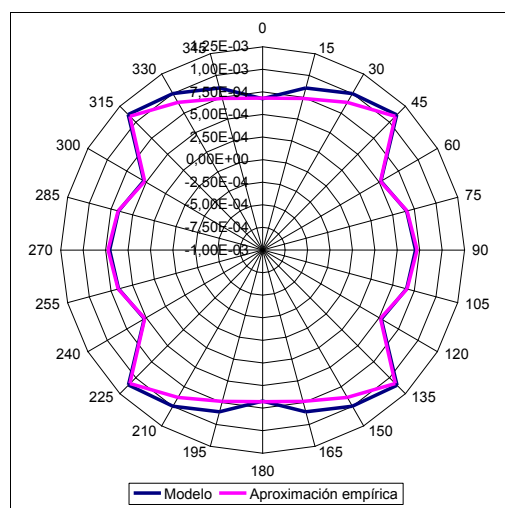


Figura 6-67. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para  $\beta=90^\circ$

## 6.6 Aplicación

Una vez obtenido el modelo de comportamiento, este puede utilizarse para obtener los parámetros geotécnicos del macizo rocoso ensayado a partir del análisis de un ensayo.

### 6.6.1 Ensayos con $\beta < \gamma$

En ensayos realizados con  $\beta < \gamma$  la metodología de cálculo para aplicar el modelo sería la siguiente:

En primer lugar se debe obtener la curva “desplazamiento radial medido –  $\sin^2\theta$ ” y ajustar los datos a una recta según se muestra en la Figura 6-68.

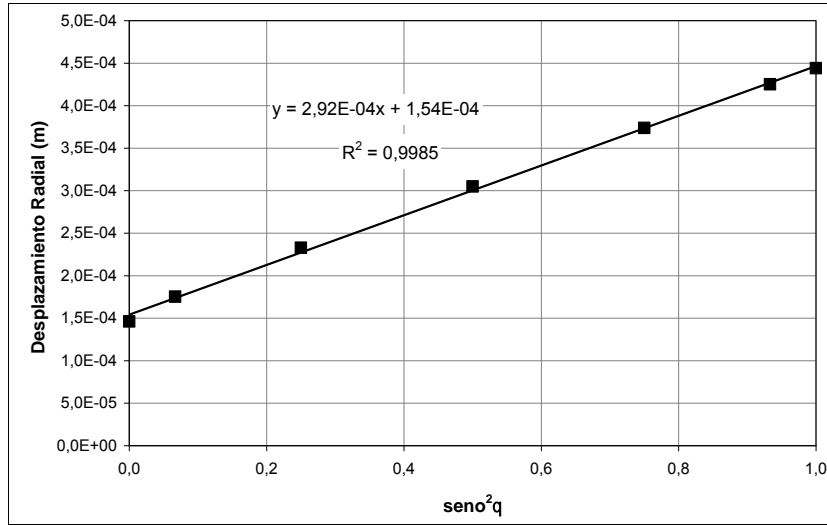


Figura 6-68. Curva “desplazamiento radial medido ( $\Delta R_{\theta}$ ) –  $\sin^2\theta$ ” obtenida a partir del modelo 3DEC para  $\beta=40^\circ$ , según los parámetros del apartado 6.3.1.

La ecuación de la recta puede interpretarse según la ecuación 6-56: El término independiente de esta, correspondiente con el desplazamiento radial medido en la dirección paralela a las capas ( $\theta = 0^\circ$ ), servirá para obtener el módulo de deformación en esta dirección según la expresión 6-57. La pendiente de la curva ( $m$ ) se corresponderá según el modelo empírico a:

$$m = \Delta R_{0^\circ} \cdot \sin^2 \beta \cdot \sin \chi \cdot (1 + 2\nu) \cdot \Gamma \quad (6-64)$$

A partir de aquí, conocidos el resto de parámetros puede despejarse  $\Gamma$  y, por tanto, obtenerse el módulo de deformación en dirección perpendicular a los planos ( $E_{90^\circ}$ ):

$$\Gamma = \frac{m}{\Delta R_{0^\circ} \cdot \sin^2 \beta \cdot \sin \chi \cdot (1 + 2\nu)} \quad (6-65)$$

$$E_{90^\circ} = \frac{E_{0^\circ}}{\Gamma} \quad (6-66)$$

A modo de ejemplo se ha realizado el cálculo de los módulos de deformación a partir del modelo calculado con un buzamiento de las juntas de  $40^\circ$  (Figura 6-69):

La recta de ajuste obtenida es:

$$\Delta R_{\theta^\circ} = 2,92 \cdot 10^{-4} \sin^2 \theta + 1,54 \cdot 10^{-4}$$

A partir de estos datos se puede obtener el módulo de deformación en la dirección perpendicular a las juntas:

$$E_{0^\circ} = (1 + \nu) \cdot R_0 \cdot \frac{\Delta P}{\Delta R_{0^\circ}} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\beta - \chi/2}{150} \right) \right] =$$

$$= (1 + 0,28) \cdot 0,05 \, m \cdot \frac{10 \, MPa}{1,54 \cdot 10^{-4} \, m} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{40 - 53,13/2}{150} \right) \right] = 4.525 \, MPa$$

El resultado obtenido en este caso es de 4525 MPa, lo que supone un error inferior al 1 % respecto a los 4500 MPa del modelo.

Siendo en este caso  $\beta = 40^\circ$ ,  $\lambda = 0,04 \, m$  y  $R_0 = 0,05 \, m$ , se obtendría la siguiente expresión:

$$\Gamma = \frac{m}{\Delta R_{0^\circ \text{ corregido}} \cdot \sin^2 \beta \cdot \sin \chi \cdot (1 + 2\nu)} = \frac{2,92 \cdot 10^{-4} \, m}{1,54 \cdot 10^{-4} \, m \cdot \sin^2 40^\circ \cdot \sin 53,13 \cdot (1,56)} = 3,68$$

$$E_{90^\circ} = \frac{E_{0^\circ}}{\Gamma} = \frac{4.525 \, MPa}{3,68} = 1.230 \, MPa$$

En este caso, la estimación del módulo de deformación perpendicular a las discontinuidades ( $E_{90^\circ}$ ) es de 1230 MPa, presentando un error respecto al módulo de deformación calculado con la expresión 6-2 (1411 MPa) inferior al 13 %.

### 6.6.2 Ensayos con $\beta > \chi$

En caso de ensayos con  $\beta > \chi$  no es posible obtener los dos módulos de deformación del macizo ( $E_{0^\circ}$  y  $E_{90^\circ}$ ). Se necesita conocer el módulo de deformación máximo ( $E_{0^\circ}$ ) para poder estimar el otro. Para la correcta aplicación del método, se requiere además conocer el valor de  $k_s$ . Ambos parámetros pueden obtenerse de una manera más o menos sencilla mediante ensayos rutinarios de laboratorio.

En primer lugar se debe “reconstruir” la curva “desplazamiento radial –  $\text{sen}^2 \theta$ ” (Figura 6-69) corrigiendo en ella el desplazamiento del cero ( $\Delta R$ ) y el “salto” producido en  $\theta = \chi / \text{sen}(\beta)$  ( $\Delta R_\chi$ ). Para ello se ha de emplear la ecuación 6-63 suponiendo unos valores de  $E_{0^\circ}$  teórico y  $k_s$ .

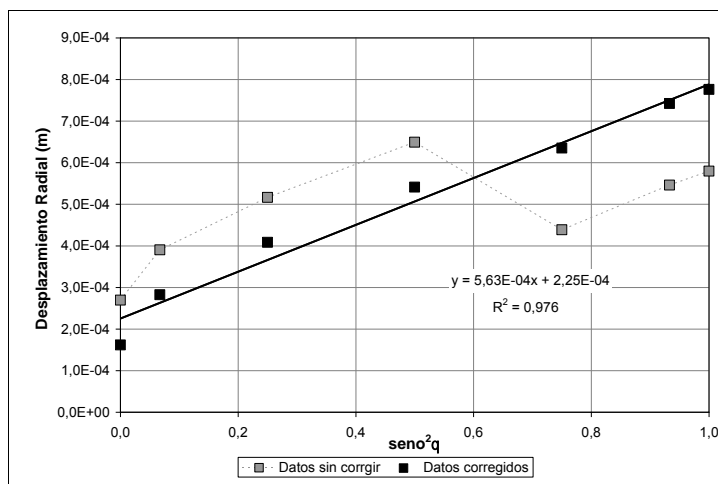


Figura 6-69. Curva “desplazamiento radial –  $\text{seno}^2 \theta$ ” obtenida a partir del modelo 3DEC para  $\beta = 70^\circ$ , según los parámetros del apartado 6.3.1.

En vez obtenida la curva corregida el procedimiento es el mismo que se expuso para el caso de  $\beta < \chi$ .

A modo de ejemplo se ha realizado el cálculo de los módulos a partir del modelo calculado con un buzamiento de las juntas de  $70^\circ$  (Figura 6-69). En primer lugar se corregirá la curva, obteniéndose  $\varepsilon'$  y  $\varepsilon_\chi$ . Suponemos, en este caso,  $E_{0^\circ} = 4500 \text{ MPa}$  y  $k_s = 800 \text{ MPa/m}$ .

$$\Delta R_{0^\circ \text{teórico}} = (1 + \nu) \cdot R_0 \cdot \frac{\Delta P}{E_{0^\circ \text{teórico}}} = 1,28 \cdot 0,05 \text{ m} \cdot \frac{10 \text{ MPa}}{4500 \text{ MPa}} = 1,42 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \Delta R' &= \Delta R_{0^\circ \text{teórico}} \left[ \sin \chi \cdot \sin \beta \left( \frac{k_s}{4000 \text{ MPa}} + 1,66 \right) \right] = \\ &= 1,42 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \left[ \sin(53,1^\circ) \cdot \sin(70^\circ) \cdot \left( \frac{800 \text{ MPa/m}}{4000 \text{ MPa/m}} + 1,66 \right) \right] = 1,99 \cdot 10^{-4} \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta R_\chi &= \Delta R_{0^\circ \text{teórico}} \left[ 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \lambda \cdot (\beta - 45^\circ) \cdot \frac{11.250 \text{ MPa/m} - k_s}{12.500 \text{ MPa/m}} \right] = \\ &= 1,42 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \left[ 2 \cdot 1,28 \cdot 0,04 \text{ m} \cdot (25) \frac{11.250 \text{ MPa/m} - 800 \text{ MPa/m}}{12.500 \text{ MPa/m}} \right] = 3,04 \cdot 10^{-4} \text{ m} \end{aligned}$$

Aplicando la ecuación 6-63 en los términos explicados anteriormente se obtendrá la curva corregida (Figura 6-69) que ha de ajustarse a una recta. En este caso, la ecuación obtenida es:

$$\Delta R_\theta = 5,63 \cdot 10^{-4} \sin^2 \theta + 2,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Ya que se ha supuesto un valor de  $E_{0^\circ} = 4500 \text{ MPa}$ , el siguiente paso es estimar la relación  $E_{0^\circ}/E_{90^\circ}$  mediante la siguiente expresión, siendo en este caso  $\beta = 70^\circ$ ,  $\lambda = 0,04 \text{ m}$  y  $R_0 = 0,05 \text{ m}$ :

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{m}{\Delta R_{0^\circ \text{teórico}} \cdot \sin^2 \beta \cdot \sin \chi \cdot (1 + 2\nu)} = \\ &= \frac{5,63 \cdot 10^{-4} \text{ m}}{1,42 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \sin^2 70^\circ \cdot \sin(53,13^\circ) \cdot (1,56)} = 2,79 \end{aligned}$$

$$E_{90^\circ} = \frac{E_{0^\circ}}{\Gamma} = \frac{4.500 \text{ MPa}}{3,59} = 1.253 \text{ MPa}$$

En este caso, la estimación del módulo de deformación en dirección perpendicular a las discontinuidades ( $E_{90^\circ}$ ) es de 1253 MPa, presentando un error respecto al módulo de deformación calculado con la expresión 6-2 (1385 MPa) inferior al 10 %.

## 6.7 Cálculo de errores

A fin de comprobar la utilidad del método de interpretación, se han calculado los diferentes errores de predicción utilizando la siguiente expresión:

$$Error = \frac{E_{teórico} - E_{calculado}}{E_{teórico}} \quad (6-67)$$

En los casos con  $\beta < \chi$  se han obtenido errores moderados y asumibles tanto en la estimación del  $E_{0^\circ}$  como en la del  $E_{90^\circ}$ , si bien para esta última son algo mayores (Tabla 6-7). Lo máximos errores calculados han sido de un 9 % para el módulo paralelo a las discontinuidades y de un 23 % para el perpendicular. En el caso de  $\beta > \chi$ , no se puede obtener el módulo  $E_{0^\circ}$ ; pero en el caso de  $E_{90^\circ}$  el error máximo calculado para este modelo se corresponde con un buzamiento de  $90^\circ$  en el que el error obtenido ha sido del 25 %.

Tabla 6-7. Errores de cálculo entre el modelo propuesto y los parámetros de entrada.

$\beta$ (°)	$\beta > \chi$	$E_{0^\circ}$ (MPa)	$E_{0^\circ}$ Calculado (MPa)	$E_{90^\circ}$ (MPa)	$E_{90^\circ}$ Calculado (MPa)	Error $E_{0^\circ}$ (%)	Error $E_{90^\circ}$ (%)
10	No	4.500	4.384	1.385	1.192	2,6	13,9
20		4.500	4.592	1.385	1.072	2,0	22,6
30		4.500	4.640	1.385	1.200	3,1	13,3
40		4.500	4.525	1.385	1.340	0,6	3,3
45		4.500	4.367	1.385	1.452	2,9	4,9
50		4.500	4.077	1.385	1.617	9,4	16,7
60	Si	4.500		1.385	1.391		0,4
70		4.500	No	1.385	1.253	No	9,6
80		4.500	calculable	1.385	1.383	calculable	0,1
90		4.500		1.385	1.731		25,0

A fin de analizar la utilidad de este método se han calculado los errores cometidos en la estimación de los módulos de deformación en modelos con otros parámetros geotécnicos, una vez calculadas las deformaciones siguiendo los mismos métodos a los descritos anteriormente. En todos los casos se ha comprobado que para grados de anisotropía ( $E_{0^\circ}/E_{90^\circ}$ ) menores o iguales a 5, los errores en la estimación de  $E_{0^\circ}$  son inferiores al 20 % (Figura 6-70). En el caso de la estimación del  $E_{90^\circ}$  el error máximo calculado ha sido del 56 % (Figura 6-71).

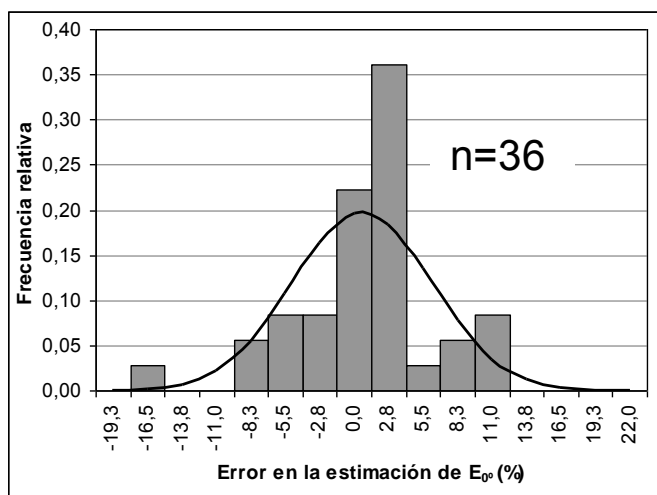


Figura 6-70. Distribución estadística de los errores de estimación de  $E_{0^\circ}$  con los modelos que presentan  $E_{0^\circ}/E_{90^\circ} \leq 5$ .

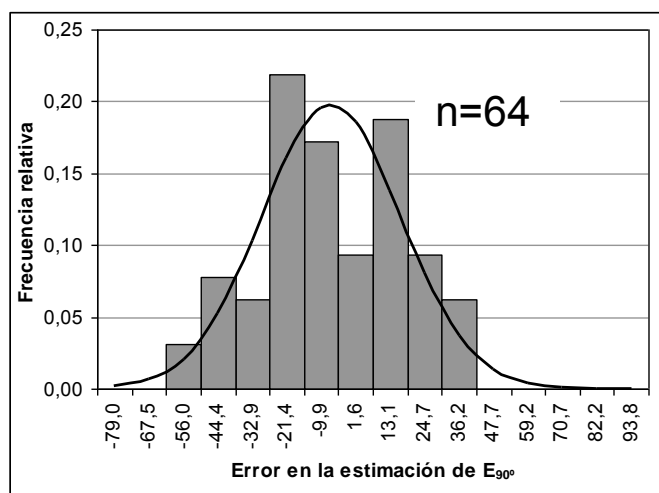


Figura 6-71. Distribución estadística de los errores de estimación de  $E_{90^\circ}$  con los modelos que presentan  $E_{0^\circ}/E_{90^\circ} \leq 5$ .

En general, para grados de anisotropía ( $E_{0^\circ}/E_{90^\circ}$ ) inferiores a 5 los errores de la estimación del  $E_{90^\circ}$  son moderados, manteniéndose por debajo del 60 % (Figura 6-71). Teniendo en cuenta que, el ratio  $E_{0^\circ}/E_{90^\circ}$  no suele superar valores de 3 (Amadei *et al.*, 1987) o 4 (Lisjak *et al.*, 2014), las ecuaciones propuestas se pueden considerar aptas para la interpretación de ensayos presiométricos en la mayor parte de los macizos rocosos anisótropos.

## 6.8 Comparación con otros métodos

Como se ha indicado en el apartado 6.1.4.1, existen otros modelos propuestos para el análisis de la deformación producida durante un ensayo de carga radial en un medio anisótropo. Cada uno de los cuatro métodos recogidos en ese apartado tiene sus propias peculiaridades y limitaciones.

Las principales limitaciones de cada uno de ellos son:

- Kawamoto (1966): Este método supone un medio anisótropo continuo, por lo que no tiene en cuenta el efecto escala (véase apartado 6.2). Por otro lado solamente es aplicable con las capas paralelas al eje de la cavidad ( $\beta=90^\circ$ ), limitando mucho su uso.
- Kiehl y Wittke (1983): Este método supone un macizo rocoso anisótropo y continuo, no teniendo en cuenta la posibilidad de deslizamiento de las discontinuidades. Los autores solo presentan solución para casos concretos ( $\beta=0^\circ$ ;  $45^\circ$ ;  $60^\circ$  y  $90^\circ$ ), si bien podría llegar a generalizarse para los casos intermedios. Su aplicabilidad se ve dificultada por la necesidad de contar con dos ensayos de referencia en el mismo material con  $\beta=0^\circ$  y  $\beta=90^\circ$ .
- Amadei y Savage (1991): Este método tiene en cuenta la discontinuidad del macizo rocoso aunque no el efecto escala y, por tanto, solamente sería válido para macizos rocosos que presenten espaciados pequeños en relación con el radio de la cavidad. Este método solamente es aplicable con la cavidad dispuesta de manera perpendicular o paralela a las discontinuidades ( $\beta = 0^\circ$  o  $90^\circ$ ).
- Kolymbas *et al.* (2012): Este método supone un medio continuo, presentando los mismos inconvenientes que los anteriores.

El modelo propuesto en esta tesis doctoral permite la interpretación de ensayos presiométricos para cualquier valor del ángulo entre el eje de la cavidad cilíndrica respecto a los planos de

discontinuidad. De entre los modelos analizados, es el único que contempla la posibilidad de deslizamiento en estos planos.

Se han comparado las deformaciones previstas con los diferentes modelos y con los datos obtenidos con el modelo numérico (Figura 6-72) observándose grandes diferencias. Los modelos que suponen un medio continuo (Kawamoto, 1966; Kiehl y Wittke, 1983) predicen deformaciones muy bajas en comparación con los modelos discontinuos (Amadei y Savage, 1991), y por tanto, si son utilizados para la interpretación de estos ensayos proporcionarán datos muy conservadores. Solamente el modelo propuesto en esta tesis doctoral recoge el deslizamiento de las discontinuidades y permite la interpretación del “salto” producido en la curva “ $\Delta R-\theta$ ”.

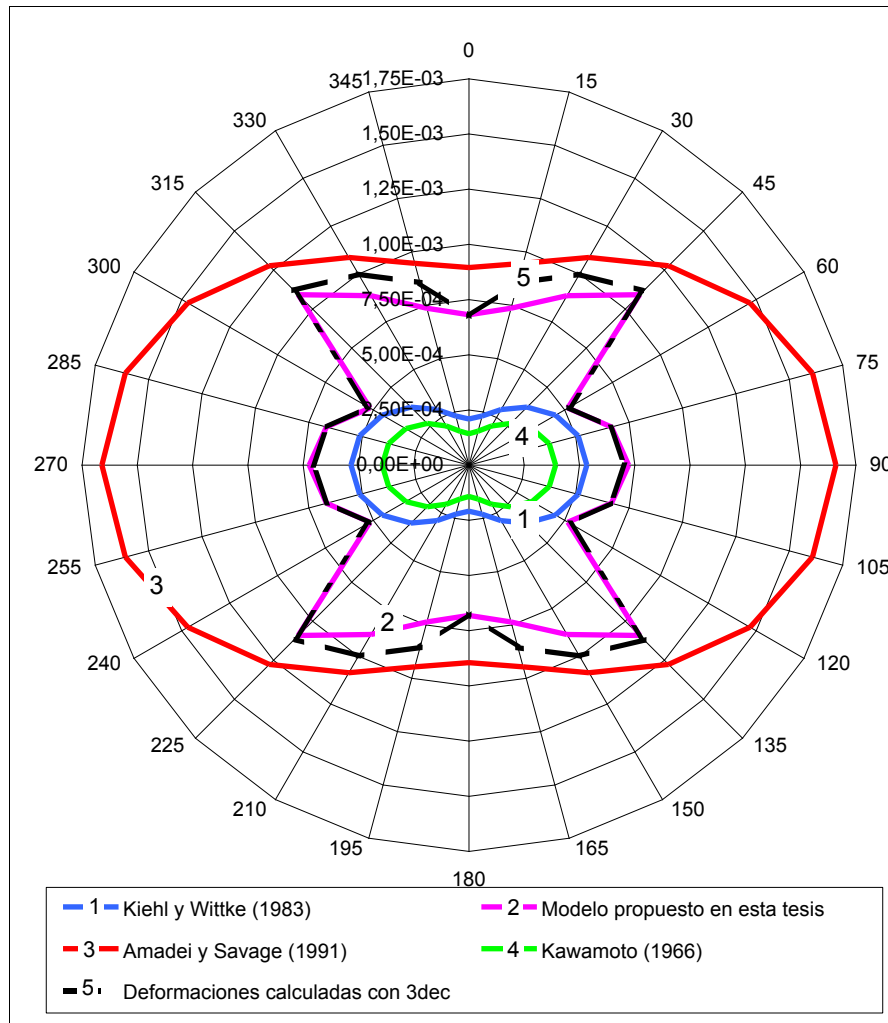


Figura 6-72. Comparación entre diferentes modelos y las deformaciones calculadas para  $\beta=90^\circ$  con los parámetros utilizados anteriormente.

La mayoría de los métodos supone una deformación en dirección paralela a las capas,  $\theta=0^\circ$ , igual a la que se produciría sin la existencia de las discontinuidades y teniendo en cuenta el módulo de deformación de la roca matriz según:

$$\Delta R_{0^\circ} = (1 + \nu) R_m \frac{\Delta P}{E_i} \quad (6-68)$$

siendo:

- $\Delta R_{0^\circ}$  = Variación de radio correspondiente a  $\theta=0^\circ$ ;
- $E_i$  = Módulo de deformación de la roca matriz;
- $\Delta P$  = Incremento de presión considerado;
- $R_m$  = Radio medio del tramo lineal considerado.

No obstante, en este trabajo se ha visto que la deformación producida en esta dirección es mayor y responde a la expresión:

$$\Delta R_{0^\circ} = (1 + \nu) R_0 \frac{\Delta P}{E_{0^\circ}} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\beta - \chi/2}{150} \right) \right] \quad (6-69)$$

En la interpretación de un ensayo en un medio como el estudiado según la formulación habitual (ecuación 6-68) supone una minusvaloración del módulo de deformación que puede llegar a ser importante en muchos casos. Con el modelo propuesto en esta tesis doctoral se han comparado los módulos de deformación obtenidos mediante las expresiones 6-68 y 6-69 con los medidos en la simulación informática (Figura 6-73). Se ha comprobado como el empleo de la expresión propuesta aquí (ecuación 6-69) disminuye considerablemente los errores de estimación del módulo de deformación máximo del macizo rocoso (en dirección paralela a las capas). Esta comparación no se ha podido realizar para buzamientos mayores a  $\chi$  ya que, como se comentó anteriormente, este modelo no permite su estimación de manera directa.

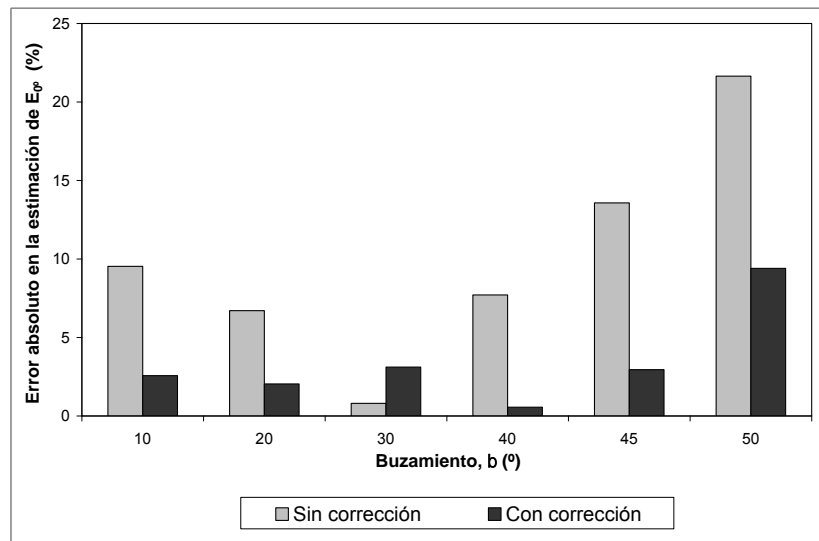


Figura 6-73. Influencia del ángulo  $\beta$  en el error cometido al calcular  $E_{0^\circ}$  una vez corregido este.

## 6.9 Conclusiones

A partir del estudio recogido en este capítulo se pueden extraer las siguientes conclusiones:



- El módulo de deformación a nivel de macizo rocoso es uno de los parámetros geotécnicos más importantes a tener en cuenta en cualquier proyecto geotécnico. Sin embargo, su obtención es compleja, sobre todo en macizos rocosos anisótropos.
- La principal fuente de anisotropía en un macizo rocoso es la presencia de una o más familias de discontinuidades paralelas entre sí (normalmente asociadas a la estratificación). La deformabilidad de estos planos de discontinuidad ( $k_n$  y  $k_s$ ) influye enormemente en la deformabilidad del macizo rocoso.
- Uno de los pocos ensayos de campo que permiten la obtención de módulos de deformación en profundidad es el ensayo presiométrico (o dilatométrico). No obstante, su interpretación habitual se basa en medios isótropos y homogéneos muy alejados del tipo de materiales aquí estudiados. Esta interpretación se basa en la solución analítica de la deformación de una cavidad cilíndrica no existiendo solución matemática para medios anisótropos y mucho menos para medios anisótropos discontinuos.
- Son varios los métodos propuestos para la interpretación de la deformabilidad de una cavidad cilíndrica en medios anisótropos, si bien se basan en medios continuos o requieren de unas condiciones geométricas muy determinadas poco útiles en zonas en las que la orientación de las capas varía enormemente, como es el caso de las unidades presentes en el fondo del estrecho de Gibraltar.
- En esta tesis doctoral se ha enfocado la solución de este problema desde un punto de vista empírico mediante el análisis de un modelo tridimensional realizado con diferencias finitas y elementos discretos, una vez comprobado que existe un importante efecto escala que desaconseja el uso de modelos continuos para relaciones entre el espaciado de las discontinuidades y el radio de la cavidad ( $\lambda/R$ ) mayores a 0,4.
- Con los datos proporcionados por el modelo, se ha observado un comportamiento de la cavidad en expansión cilíndrica dependiente del ángulo de buzamiento de las capas. Se ha encontrado un ángulo de buzamiento crítico ( $\chi$ ) a partir del cual se produce un deslizamiento relativo entre las diferentes capas involucradas en el ensayo que produce un “salto” en la curva “desplazamiento radial ( $\Delta R$ ) –  $\theta$ ” (siendo  $\theta$  el ángulo entre la dirección de medida y la dirección de las capas). El punto de la curva en el que se produce el deslizamiento se corresponde con  $\theta = \chi / \sin(\beta)$ .
- Se han obtenido una serie de ecuaciones que permiten estimar los módulos de deformación máximo y mínimo en un macizo rocoso anisótropo por fisuración, con unos errores máximos del 7 % y el 36 %, respectivamente, con ángulos de buzamiento inferiores a  $\chi$ ; y del 25 % en la estimación de  $E_{90^\circ}$  en ensayos con ángulos mayores a  $\chi$ . Estos errores son suficientemente bajos como para recomendar el uso de este método de interpretación.
- El modelo propuesto permite la estimación de los principales parámetros deformacionales de un macizo rocoso con anisotropía debida a la fisuración a partir de los resultados de un ensayo presiométrico. A diferencia de otros métodos, considera un medio discontinuo y el posible deslizamiento de las juntas.
- Las expresiones propuestas son válidas para cualquier valor del ángulo formado entre los planos de discontinuidad y el eje de la cavidad.

# **CAPÍTULO 7**

## **CONCLUSIONES**



# 7.

## CONCLUSIONES

---

En esta tesis se ha profundizado en la caracterización geotécnica de las unidades involucradas en el Proyecto de enlace fijo entre Europa y África a través del Estrecho de Gibraltar. Se han recopilado y analizado los datos geotécnicos generados por el proyecto (capítulos 3 y 4), obteniendo parámetros aplicables en el diseño de la solución constructiva y se ha determinado el grado de caracterización de cada una de las unidades permitiendo la optimización de futuros trabajos (capítulo 5). Por otro lado se ha estudiado el comportamiento de estas formaciones geológicas frente a la expansión de una cavidad cilíndrica, proponiéndose una metodología de análisis de estos ensayos (capítulo 6).

A continuación se recogen las principales conclusiones alcanzadas en esta tesis:

### **7.1 Caracterización geotécnica de las unidades involucradas en el proyecto**

- El uso de métodos estadísticos sencillos, en consonancia con lo propuesto por el Eurocódigo 7, ha posibilitado el aprovechamiento de los datos generados por los estudios realizados en el proyecto de enlace fijo a lo largo de más de 30 años. Este análisis estadístico ha permitido la obtención de parámetros geotécnicos de las diferentes unidades, así como determinar el grado de caracterización de cada una de ellas.
- Los valores característicos estimados para cada parámetro podrán ser empleados en las posteriores fases del proyecto dotando de mayor certidumbre a los cálculos que se realicen y permitiendo una mejor estimación de las soluciones constructivas y de los presupuestos necesarios para su desarrollo.
- Los principales parámetros obtenidos se resumen en el Apéndice IV, pudiendo destacarse:
- Las Brechas pliocuaternarias y la unidad de Almarchal presentan las peores características geotécnicas de las unidades estudiadas.
- La mayoría de las unidades presentan un carácter prácticamente impermeable tanto a escala de laboratorio como a escala de macizo rocoso. Solamente las arenas bioclásticas no presentan este carácter. En las brechas no se ha determinado este parámetro a escala de

macizo, debido a la dificultad que supone su situación en el centro del Estrecho, si bien se esperan permeabilidades bajas.

- Se ha detectado expansividad en las arcillas de las unidades de Algeciras, Almarchal y Facinas y en las Brechas. Dado que se ha observado una composición mineralógica similar en todos los tramos arcillosos estudiados, es de esperar que esta expansividad se pueda producir en las arcillas de cualquiera de las unidades.
- La Unidad de Algeciras se ha dividido en tres litologías: arcillosa, detrítica y calcárea, siendo las propiedades geotécnicas de cada una de ellas diferentes. Para los tramos arcillosos se ha calculado un valor característico de la resistencia a compresión simple de unos 15 MPa y unos 4000 MPa para el módulo de deformación. Los materiales detríticos presentan unos valores de 25 MPa para la resistencia y unos 6000 MPa para el módulo. Los materiales calcáreos resultan mucho más competentes a escala de roca matriz con valores de resistencia de entre 35 y 56 MPa, y de entre 7000 y 47000 MPa para el módulo de deformación.
- La unidad de Bolonia es semejante a la de Algeciras. Los valores calculados para la resistencia a compresión simple son más altos que en el caso de la Unidad de Algeciras (75 MPa en los tramos arcillosos) si bien el número de datos es mucho más pequeño y los valores calculados presentan una menor certidumbre.
- La unidad de Almarchal, principalmente arcillosa, presenta unos parámetros resistentes y deformacionales bajos, con valores de resistencia a compresión simple por debajo de 1 MPa y módulos de deformación inferiores a 20 MPa.
- Para la unidad de Facinas se han calculado valores de resistencia a compresión simple de unos 28 MPa. No hay muchos más datos destacables debido a la escasez de los mismos.
- Las brechas cuaternarias presentan unas propiedades geotécnicas malas. El valor característico de resistencia a compresión simple no llega a 1 MPa y su módulo de deformación a escala de laboratorio se encuentra en torno a los 100 MPa.

## **7.2 Grado de caracterización de cada unidad**

- En esta tesis doctoral se ha definido un nuevo criterio para la determinación del grado de certidumbre de un parámetro geotécnico. Este criterio se ha empleado con los materiales de estudiados aquí.
- A partir del análisis del grado de caracterización de cada unidad se puede extraer lo siguiente:
  - Las unidades de Almarchal y Algeciras son las más y mejor caracterizadas.
  - La unidad de Facinas y las arenas bioclásticas son los materiales menos caracterizados.
  - Los parámetros índice y de identificación, en general, están bien determinados en todas las unidades.
  - Los parámetros resistentes a escala de macizo rocoso, así como los criterios de rotura, están poco o nada determinados. Lo mismo ocurre con las características deformacionales.
  - El comportamiento geomecánico de las discontinuidades está poco estudiado. En el caso de macizos rocosos los planos de discontinuidad (estratificación, diaclasado, fallas, etc.) suponen su principal punto de debilidad y deformabilidad, por tanto la correcta

determinación de sus propiedades resistentes y deformacionales es crítica para la correcta determinación del comportamiento esperado en un macizo.

- Los datos geomecánicos recopilados (grado de fracturación, RMR, Q, etc.) son muy escasos, no permitiendo estimar las características resistentes y deformacionales de los diferentes materiales a escala de macizo rocoso.
- Otro parámetro del que no se cuenta con datos es el estado tensional, no habiendo datos fiables en el fondo del Estrecho ni en ninguna de las dos orillas. Estos puntos suponen dos de las principales carencias del proyecto.
- La dispersión de datos dentro de cada unidad es grande debido a la gran extensión de la zona de estudio y a la propia heterogeneidad de las unidades. Esto implica, más allá de los estudios estadísticos realizados, la necesidad de realizar un mayor número de ensayos *in situ* a lo largo de toda la traza del futuro enlace.

### **7.3 Nueva metodología para la interpretación de ensayos presiométricos en medios con anisotropía transversal por fisuración**

- Las unidades estudiadas presentan una importante anisotropía debida a la presencia de planos de discontinuidad (estratificación y laminaciones). La orientación de estos planos varía, pudiendo encontrarse puntos con estratificaciones subverticales y otros con estratificaciones subhorizontales. Estos hechos complican los cálculos necesarios para el diseño del túnel a la vez que dificultan la realización e interpretación de ensayos *in situ*, así como la extrapolación de datos obtenidos en el laboratorio a la escala del macizo rocoso.
- También hay que tener en cuenta la dificultad de acceso a gran parte de la zona de estudio, que produce que las técnicas de ensayo *in situ* deban poder realizarse en el interior de sondeos. Esto hace de las técnicas presiométricas una de las únicas herramientas válidas para la determinación de los parámetros deformacionales (también resistentes) a escala de macizo rocoso. Sin embargo, la interpretación tradicional de los ensayos presiométricos asume que el material es isótropo y homogéneo.
- Existen varias metodologías para la interpretación del ensayo de expansión de una cavidad cilíndrica en medios anisótropos. Estas metodologías presentan dos limitaciones principales: muchas de ellas solamente son aplicables cuando la cavidad (o sondeo) se ha realizado en orientaciones concretas respecto a los planos de anisotropía (normalmente 0° o 90°); y todas ellas suponen que el material es un elemento continuo. Dadas las condiciones geológicas de la zona de estudio, donde los materiales son eminentemente discontinuos por la presencia de planos de estratificación y que es posible encontrar estos planos en cualquier orientación, estas metodologías no son aplicables.
- En esta tesis se propone una nueva metodología de interpretación de los ensayos presiométricos en medio anisótropo por fisuración tomando como base un modelo numérico tridimensional con un software que emplea diferencias finitas y elementos discontinuos. Para la elección de este modelo se han comparado diferentes técnicas de cálculo obteniendo las siguientes conclusiones:
  - Los modelos anisótropos continuos no tienen en cuenta la posición de los planos de discontinuidad respecto al eje del sondeo, mientras que los modelos discontinuos presentan importantes diferencias con la variación de esta posición.
  - Los modelos continuos y los discontinuos aportan datos semejantes para valores bajos de espaciado de las discontinuidades entre el radio inicial del sondeo ( $\lambda/R$ ). Para valores

de  $\lambda/R$  mayores a 0,4 los modelos continuos aportan valores muy diferentes a los modelos discontinuos. Este efecto de escala aumenta al aumentar el grado de anisotropía.

- En el modelo discontinuo adoptado se han incorporado los parámetros geotécnicos obtenidos para los materiales arcillosos de la Unidad Algeciras y se han simulado ensayos presiométricos, observándose los siguientes fenómenos:
  - Existe un ángulo crítico  $\chi$ , entre el plano de aplicación de tensiones (perpendicular al eje del sondeo) y los planos de discontinuidad, a partir del cual el comportamiento del material ensayado varía.
  - Para valores de buzamiento ( $\beta$ ) inferiores a  $\chi$ , el desplazamiento radial observado tras el ensayo ( $\Delta R$ ) varía de manera continua con la orientación ( $\theta$ ) de la medida respecto a la dirección de las capas.
  - Para valores de  $\beta$  superiores a  $\chi$  se produce una discontinuidad o “salto” en la curva  $\varepsilon$ - $\theta$  debido al deslizamiento relativo de las discontinuidades. Este salto se produce precisamente con  $\theta=\chi$ .
  - A partir de las deformaciones calculadas con el modelo, en la simulación del ensayo presiométrico se han obtenido unas ecuaciones empíricas que estiman la deformación obtenida a partir de los parámetros geotécnicos del material ensayado
- Estas ecuaciones permiten una interpretación más precisa de los ensayos presiométricos realizados en un medio anisótropo por fisuración. Con las metodologías propuestas se han calculado los siguientes errores entre los módulos de deformación del modelo y los calculados:
  - Para valores de  $\beta$  inferiores a  $\chi$  se ha calculado un error menor al 10 % en la estimación de  $E_{0^\circ}$  y un error máximo del 23 % en la estimación de  $E_{90^\circ}$ .
  - Para valores de  $\beta$  superiores a  $\chi$  se ha calculado un error máximo en la estimación de  $E_{90^\circ}$  del 25 % en el caso de  $\beta=90^\circ$ . Para el resto de buzamientos el error máximo calculado es inferior al 10 %. Con  $\beta>\chi$  no es posible estimar el módulo  $E_{0^\circ}$ .
- A la vista de esta nueva metodología, las sondas presiométricas más adecuadas para el ensayo de estos materiales son aquellas con medida radial, debiendo de ser el número de sensores suficiente para la aplicación correcta de este método.

## **CAPÍTULO 8**

### **FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y RECOMENDACIONES AL PROYECTO**





## 8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y RECOMENDACIONES AL PROYECTO

---

### 8.1 Futuras líneas de investigación

A fin de continuar con el estudio realizado en esta tesis, se proponen a continuación diferentes aspectos que resultarían de especial interés para su posterior investigación:

- En esta tesis se han empleado herramientas estadísticas simples con los datos recopilados. El empleo de otras metodologías más complejas y la comparación de los resultados obtenidos permitiría reducir, aun más, las incertidumbres correspondientes a los materiales geológicos del proyecto.
- Esta tesis ha dado un primer paso en el estudio de la expansión de una cavidad cilíndrica en un medio transversalmente anisótropo por fisuración. Este estudio abre una línea de investigación en la que podrían contemplarse diferentes variables como son: las variaciones estadísticas de las características de las discontinuidades (espaciado, ángulo de buzamiento, etc.); la presencia de más de una familia; la presencia de rellenos en las mismas, posiciones diferentes a las estudiadas aquí; o el empleo modelos de comportamiento más complejos en los que se pueda tener en cuenta la dilatancia de las discontinuidades, deformaciones no elásticas de la roca matriz, etc.
- En este trabajo no se han podido comparar los datos proporcionados por el modelo con medidas reales realizadas *in situ*. La realización de modelos físicos simplificados (modelos análogos) o la realización de ensayos en condiciones reales controladas ayudaría en gran medida a la interpretación de los ensayos de expansión (como el presiométrico) en este tipo de materiales, dando una mayor certidumbre a los datos obtenidos con este tipo de técnicas.

## 8.2 Recomendaciones al proyecto

Tras este estudio se han observado ciertos aspectos que sería recomendable tener en cuenta a la hora de progresar en el proyecto de enlace fijo a través del Estrecho de Gibraltar. Estos aspectos serían:

- La incorporación de todos los datos, los recopilados en esta tesis y aquellos de otras temáticas generados o de interés para el proyecto, en un sistema de información geográfica (SIG) que permitiera una rápida consulta de los datos así como la incorporación a los estudios de variables geográficas.
- Dentro de los estudios de caracterización geotécnica del área del estrecho de Gibraltar sería de sumo interés la recopilación y posterior análisis de los trabajos de reconocimiento que se realicen a partir de ahora, de una manera sistemática. Esto disminuiría las incertidumbres inherentes a estos materiales.
- Un mayor número de datos permitiría además la realización de diferentes tipos de estudios estadísticos en los que se podría analizar con detalle las variaciones espaciales de los materiales.
- Realización de un protocolo de toma de muestras, conservación y análisis que permitiera disminuir las incertidumbres creadas por la influencia de la humedad en los resultados.
- La determinación del estado tensional del área de estudio. El conocimiento preciso de las tensiones naturales permitiría una mejor interpretación de los ensayos de caracterización geotécnica que se realicen así como una mejor predicción del comportamiento de las diferentes unidades en la ejecución del proyecto.
- La determinación de las características geomecánicas del macizo rocoso. La determinación de parámetros como RMR, Q o GSI es de gran importancia en el diseño de túneles.
- Realización de ensayos presiométricos a lo largo de toda la traza del proyecto (o en los apoyos si se optase por una solución puente). La nueva metodología de interpretación presentada aquí permitiría la obtención de parámetros deformacionales de calidad para las diferentes unidades disminuyendo las incertidumbres del proyecto.
- Diseño de sondas multiparámetro con equipo presio-dilatométrico basado en las conclusiones alcanzadas en este estudio. Dada la dificultad y el coste que supone la realización de estudios en el fondo del Estrecho sería de gran utilidad el empleo de estas sondas que permitieran en una sola maniobra la obtención de diferentes parámetros geomecánicos de gran interés. Estas sondas podrían incluir un dispositivo presiométrico dotado con las características necesarias para el empleo correcto del método propuesto en esta tesis. Otros sensores que pueden ser de gran interés serían, por ejemplo, una cámara de video que permitiera, en tiempo real, seleccionar los puntos de ensayo; un *televiwer* acústico que ayudaría a la correcta interpretación de los ensayos en base a la fracturación del punto de ejecución. La incorporación adicional de sensores geofísicos de tipo sísmico (p. ej. PS-logger) aumentaría en gran medida la información obtenida en cada una de las maniobras realizadas con la sonda.
- Dada la gran variabilidad de los materiales y su heterogeneidad y anisotropía, además de continuar con el trabajo estadístico desarrollado en esta tesis parece razonable la idea, planteada en numerosas ocasiones por varios expertos relacionados con este proyecto, de realización de una galería de investigación, a modo de túnel piloto, que permitiera un estudio a escala real de toda la traza.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdellah, A. G. y Mohammed, B. (1986). *Etude des caracteristiques geotechniques des argilites du tangerois*. Tesis Doctoral, Universsite Mohammed V, Rabat.
- AENOR (1990). *UNE 22950-1. Propiedades mecánicas de las rocas, ensayos para la determinación de la resistencia. Parte 1: Resistencia a la compresión uniaxial*. 4 pp. Madrid
- AENOR (1996a). *UNE 103-600. Determinación de la expansividad de un suelo en el aparato Lambe*. 8 pp. Madrid
- AENOR (1996b). *UNE 22950-5. Propiedades mecánicas de las rocas: Ensayos para la determinación de la resistencia: Parte 5: Resistencia a carga puntual*. Madrid
- AENOR (2003). *UNE-EN 1990-0: Eurocódigo 0: Bases de cálculo de estructura*. Madrid
- AENOR (2010). *UNE-EN 1997-1: Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales*. Madrid
- AFNOR (1991). *NF P 94-110. Essai pressiometrique Menard*. Paris
- Amadei, B. y Savage, W. Z. (1991). Analysis of borehole expansion and gallery tests in anisotropic rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 28(5), 383-396.
- Amadei, B.; Savage, W. Z. y Swolfs, H. S. (1987). Gravitational stresses in anisotropic rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 24(1), 5-14.
- Andrieux, J.; Fontbote, J. M. y Mattauer, M. (1971). Sur un modele explicatif de l'arc de Gibraltar. *Earth and Planetary Science Letters*, 12(2), 191-198.
- Andrieux, J. y Mattauer, M. (1973). Precisions sur un modele explicatif de l'Arc de Gibraltar: An explanatory model for the Gibraltar Arc (in L'Arc de Gibraltar). *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 15(2), 115-118.
- Aydan, Ö. y Kawamoto, T. (2000). The Assessment of mechanical properties of rock masses through RMR rock classification system *Proceedings of GeoEng 2000 Symposium*. Sydney, Australia.
- Aydan, Ö.; Ulusay, R. y Kawamoto, T. (1997). Assessment of rock mass strength for underground excavations. *International Journal of rock Mechanics and Mining Engineering*, 34, 3-4.
- Aydan, Ö.; Ulusay, R. y Tokashiki, N. (2013). A New Rock Mass Quality Rating System: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and Its Application to the Estimation of Geomechanical Characteristics of Rock Masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(4), 1255-1276.
- Balanya, J. C. y Garcia-Dueñas, V. (1987). Les directions structurales dans le Domaine d'Alboran de part et d'autre du Detroit de Gibraltar. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de L'Academie des Sciences. Paris*, 304(15), 929-933.
- Bandis, S. C.; Lumsden, A. C. y Barton, N. R. (1983). Fundamentals of rock joint deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 20(6), 249-268.
- Barton, N. (1972). Model study of rock-joint deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9(5), 579-&.

- Barton, N. (1983). Application of Q system and index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses *Panel Report, International Symposium on Engineering Geology and Underground Construction*. Lisbon, Portugal.
- Barton, N. (1995). The influence of joint properties in modelling rock masses *Proceedings of 8th Congress on Rock Mechanics* (Vol. 3, pp. 1026-1052). Tokio.
- Barton, N. (1996). Estimating rock mass deformation modulus for excavation disturbed zone studies *International Conference on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, EDZ workshop* (pp. 133-144). Winnepeg: Canadian Nuclear Society.
- Barton, N. y Bandis, S. (1990, 1990). *Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice*. International Symposium on Rock Joints, Loen.
- Barton, N.; Loset, F.; Lien, R. y Lunde, J. (1980). Application of Q-System in design decision concerning dimensions and appropriate support for underground installation *Proceedings of Rockstore 80 Symposium* (Vol. 2, pp. 553-561). Stockholm: Pergamon.
- Beiki, M.; Bashari, A. y Majdi, A. (2010). Genetic programming approach for estimating the deformation modulus of rock mass using sensitivity analysis by neural network. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(7), 1091-1103.
- Bieniawski, Z. T. (1978). Determining rock mass deformability - Experience from case histories. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 15(5), 237-247.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering*: John Wiley & Sons, cop.
- Blioumi, A. y Kolymbas, D. (2010). Cavity expansion in anisotropic rock. *Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering*, 367-370.
- Blioumi, A. y Kolymbas, D. (2011). *Deformation of cylindrical cavities in cross-anisotropic rock*. 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Athens, Greece.
- Bond, A. y Harris, A. (2008). *Decoding Eurocode 7*. London: Taylor & Francis.
- Boyd, R. D. (1993). Elastic properties of jointed rock masses with regard to their rock mass rating value. *Engineering Geology of Weak Rock*, 8, 329-336.
- Briaud, J.-L. (1992). *The pressuremeter*. Rotterdam [etc.]: A.A. Balkema.
- Carvalho, J. (2004). *Estimation of rock mass modulus*. Recogido en Hoek y Diederichs (2006).
- CEDEX (1983a). *Ensayos realizados con muestras de suelo procedentes de sondeos efectuados para los estudios previos del túnel bajo el estrecho de Gibraltar*. Informe técnico. Madrid.
- CEDEX (1983b). *Resultados de los ensayos presiométricos realizados en Tarifa a petición de SECEGSA para el sondeo número 7*. Informe técnico. Madrid.
- CEDEX (1983c). *Resultados de los ensayos presiométricos realizados en Tarifa a petición de SECEGSA para el sondeo número 9*. Informe técnico. Madrid.
- CEDEX (1984). *Resultados de los ensayos realizados con muestras de suelos procedentes de sondeos efectuados para los estudios previos del túnel bajo el estrecho de Gibraltar. Primer informe*. Informe técnico. Madrid.
- CEDEX (1985a). *Informe sobre los resultados de los ensayos in situ efectuados en el emplazamiento de un enlace fijo a través del Estrecho para la unión de España y Marruecos*. Informe técnico. Madrid.

CEDEX (1985b). *Informe sobre los resultados de los ensayos in situ efectuados en el emplazamiento de un enlace fijo a través del Estrecho para la unión de España y Marruecos. 2ª Parte.* Informe técnico. Madrid.

CEDEX (1986). *Resultados de los ensayos realizados con veintisiete muestras de los suelos procedentes del Túnel de Gibraltar.* Informe técnico. Madrid.

CEDEX (1987a). *Resultados de la segunda campaña de ensayos in situ efectuados para el tunel de Gibraltar.* Informe técnico. Madrid.

CEDEX (1987b). *Resultados de los ensayos realizados con muestras procedentes del túnel de Gibraltar (Tarifa).* Informe técnico. Madrid.

CEDEX (1992a). *NLT-251/91 Determinación de la durabilidad al desmoronamiento de rocas blandas.* Madrid: MOPT, Dirección General de Carreteras, CEDEX.

CEDEX (1992b). *NLT 250. Ensayos de suelos: determinación de la resistencia a comprensión simple de probetas de roca.* Madrid

CEDEX (1992c). *NLT 251. Determinación de la durabilidad al desmoronamiento de rocas blandas.* 3 pp. Madrid

CEDEX (1999). *Estudio geotécnico de muestras procedentes del Estrecho de Gibraltar.* Informe técnico. Madrid.

CEDEX (2005). *Estudio geotécnico de muestras procedentes del estrecho de Gibraltar año 2005.* Informe técnico. Madrid.

CEDEX (2012a). *Realización de una campaña de investigación, con obtención de muestras inalteradas del terreno para posteriores ensayos en laboratorio y en sayos "in situ", en el interior de la galería experimental de Tarifa (Cádiz). Informe sobre la caracterización geotécnica mediante ensayos de laboratorio de las formaciones atravesadas por la galería experimental de Tarifa (Cádiz).* 81-311-0-001 (IP4). Vol. 4, 115 pp. Informe técnico. Madrid.

CEDEX (2012b). *Realización de una campaña de investigación, con obtención de muestras inalteradas del terreno para posteriores ensayos en laboratorio y en sayos "in situ", en el interior de la galería experimental de Tarifa (Cádiz). Informe sobre la comparación de resultados de ensayos in situ y de laboratorio realizados en las formaciones atravesadas por la galería experimental de Tarifa (Cádiz).* 81-311-0-001 (IP5). Vol. 5, 89 pp. Informe técnico. Madrid.

CEDEX (2012c). *Realización de una campaña de investigación, con obtención de muestras inalteradas del terreno para posteriores ensayos en laboratorio y en sayos "in situ", en el interior de la galería experimental de Tarifa (Cádiz). Informe sobre los ensayos geofísicos realizados en la galería experimental de Tarifa (Cádiz).* 81-311-0-001 (IP-3). Vol. 3, 172 pp. Informe técnico. Madrid.

CEDEX (2012d). *Realización de una campaña de investigación, con obtención de muestras inalteradas del terreno para posteriores ensayos en laboratorio y en sayos "in situ", en el interior de la galería experimental de Tarifa (Cádiz). Informe sobre los ensayos presiométricos realizados para el estudio geotécnico de las formaciones atravesadas por al galería experimental de Tarifa (Cádiz).* 83-311-0-001 (IP2). Vol. 2, 81 pp. Informe técnico. Madrid.

CEDEX (2012e). *Realización de una campaña de investigación, con obtención de muestras inalteradas del terreno para posteriores ensayos en laboratorio y en sayos "in situ", en el interior de la galería experimental de Tarifa (Cádiz). Informe sobre los trabajos realizados para el estudio geotécnico de las formaciones atravesadas por la galería experimental de Tarifa (Cádiz).* 81-311-0-001 (IP1). Vol. 1, 137 pp. Informe técnico. Madrid.

CEPASA (2005). *Resultados de los ensayos de laboratorio realizados con muestras procedentes del Estrecho de Gibraltar. Año 2005.* . Informe técnico.



Clerici, A. (1993). Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses - Case histories. *Eurock 93, Lisboa, Portugal - Proceedings : Safety and Environmental Issues in Rock Engineering, Vol 1*, 509-517.

CMS (1992). *Travaux de sondages mécaniques de reconnaissance de formations du tangerois pour l'étude géologique et géotechnique d'un ouvrage de liaison fixe Europe-Afrique. Deuxième campagne de sondages mécaniques à terre dans le Tangerois. Essais de perméabilité type Lugeon et Lefranc*. In Compagnie marocaine de sondages (Ed.), Informe técnico.

Coon, R. F. y Merritt, A. H. (1970). Determination of the in situ modulus of deformation of rock *ASTM special technical publication 477* (pp. 154-173): American Society for testing and materials.

Crespo-Blanc, A.; Balanyá, J. C.; Expósito, I.; Luján, M. y Díaz-Azpiroz, M. (2007). Acreción miocena del dominio suribérico y del complejo de los flyschs (Arco de Gibraltar): Una revisión a partir de las propuestas de V. García-Dueñas. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 20(3-4), 135-152.

Chraïbi, A.; Mekboul, M. y Monkachi, M. (1995). *Puits experimental de Malabata*. IV coloquio internacional sobre el enlace fijo del estrecho de Gibraltar, Sevilla.

Chun, B.-S.; Ryu, W. R.; Sagong, M. y Do, J.-N. (2009). Indirect estimation of the rock deformation modulus based on polynomial and multiple regression analyses of the RMR system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), 649-658.

Deere, D. U.; Hedron, A. J.; Patton, F. D. y Cordin, E. J. (1967). Design of surface and near-surface construction in rock. Fairhurst (Ed.), *Proceedings of 8th Symposium in Rock Mechanics* (pp. 237-302). New York: American Institute of Mining Engineers.

Deere, D. U. y Miller, E. P. (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock*. In laboratory (Ed.), Informe técnico. New Mexico.

Didon, J. (1960). Le Flysch gaditan au Nord et au Nord-Est d'Algesiras (Prov. de Cadix, Espagne). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7, 352-361.

Didon, J. (1967). L'Unité parautochtone d'Almarchal dans la zone du Flysch du Campo de Gibraltar (Espagne méridionale). *Compte Rendu Sommaire des séances de la Société Géologique de France*, 5, 201-208

Didon, J. (1969). *Étude géologique du Campo de Gibraltar (Espagne)*. Tesis Doctoral, Université de Paris (Francia). 539 pp.

Didon, J. (1973). Accidents transverses et coulissages longitudinaux dans la partie nord de l'arc de Gibraltar (Cordillères bétiques occidentales Espagne). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7(XV).

Didon, J.; Durand-Delgá, M.; Esteras, M.; Feinberg, H.; Magné, J. y Sutter, G. (1984). The numidian sandstones formation in the Gibraltar Arch stratigraphically lies between Oligocene clays and Burdigalian (lower Miocene) marls. *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie II*, 299(3), 121-128.

Didon, J.; Durand-Delgá, M. y Kornprobst, J. (1973). Homologies géologiques entre les deux rives du détroit de Gibraltar. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7(15), 17-105.

Didon, J. y Hoyez, B. (1978). Le Numidien dans l'arc bético-rifain; hypothèses sur sa mise en place sédimentaire et tectonique. *Annales de la Société géologique du Nord*, 98, 9-24.

Diederichs, M. S. y Kaiser, P. K. (1999). Stability of large excavations in laminated hard rock masses: the vauchoir analogue revisited. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36, 97-117.

Dong, W.; Pimentel, E. y Anagnostou, G. (2013). Experimental Investigations into the Mechanical Behaviour of the Breccias Around the Proposed Gibraltar Strait Tunnel. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(5), 923-944.

- Duncan, J. M. y Goodman, R. E. (1968). *Finite element analysis of slopes in jointed rock. Final report to U.S. Army Corps of Engineers* Informe técnico. Vicksburg, MI.
- Durand-Delgá, M. (1973). La courbure de Gibraltar, extrémité occidentale des zones alpines, unit l'Europe et l'Afrique. *Eclogae Geol. Helv.*, 65(2), 267-278.
- Durand-Delgá, M. (1980). La Méditerranée occidentale: étapes de sa genèse et problèmes structuraux liés à celle-ci *Livre jubilaire du cent cinquantième de la Société géologique de France, 1830-1980. Memoire hors-serie* (Vol. 10, pp. 203-224).
- Ebisu, S.; Aydan, Ö.; Komura, S. y Kawamoto, T. (1992). Comparative study of various rock mass characterization methods for surface structures *Proceedings of the Eurock'92* (pp. 203-208). London: Thomas Telford.
- Eisenstein, Z. (1994). *Evaluation and interpretation of field measurement data from the Bolonia experimental shaft*. Informe técnico.
- Esteras, M. (2000). *Nota sobre la clausura del Pozo de Bolonia*. Informe técnico.
- Esteras, M. y Bahmad, A. (1989). Geological investigations for the construction of a tunnel in the Strait of Gibraltar. Serrano (Ed.), *Tunnels and Water: Water and Its Influence on the Design, Construction, and Exploitation of Tunnels and Underground Works* (Vol. 1-3, pp. 789-796). Madrid: ITS.
- Esteras, M.; Izquierdo, J.; Sandoval, N. y Bahmad, A. (2000). Evolución morfológica y estratigráfica pliocuaternaria del Umbral de Camarinal (Estrecho de Gibraltar) Basada en sondeos marinos. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 539-550.
- Esteras Martín, M. (1982). *Geología de la orilla europea del Estrecho de Gibraltar*. Madrid: SECEG.
- Esteras Martín, M.; Martín-Algarra, A. y Martín-Martín, M. (2004). Complejo del Campo de Gibraltar: Estratigrafía. Vera (Ed.), *Geología de España* (pp. 391-395). Madrid: SGE-IGME.
- Fortsakis, P.; Nikas, K.; Marinos, V. y Marinos, P. (2012). Anisotropic behaviour of stratified rock masses in tunnelling. *Engineering Geology*, 141, 74-83.
- Franklin, J. A. y Chandra, R. (1972). Slake-durability test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9(3), 325-328.
- Franklin, J. A. y Dusseault, M. B. (1989). *Rock engineering*. New York [etc.]: McGraw-Hill.
- Galera, J. M.; Álvarez, M. y Bieniawski, Z. T. (2005). Evaluation of the deformation modulus of rock masses: Comparison of pressuremeter and dilatometer test with RMR prediction *ISP5-PRESSIO 2005 International Symposium*. Paris.
- Gallego Herrera, F. (1929). *Anteproyecto del tubo bajo el estrecho de Gibraltar*.
- García González, E. (1996). *Resumen descriptivo de los trabajos de investigación geotécnica*. In Seceg (Ed.), Informe técnico.
- Gavala, J. (1924). *Mapa Geológico de la provincia de Cádiz, escala 1:200.000*. Madrid: IGME.
- Geocisa (1993). *Informe sobre los ensayos de laboratorio realizados con probetas obtenidas del Pozo de Bolonia*. Informe técnico. Madrid.
- Geocontrol (1995a). Caracterización geomecánica del terreno atravesado por el túnel experimental de Tarifa. Formaciones Flysch y Pelitas rojas de Oligoceno.
- Geocontrol (1995b). *Ensayos de carga con gripper en el túnel experimental de Tarifa*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (1995c). *Resultados de la auscultación realizada en la galería experimental de Tarifa*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (1998). *Análisis de la información obtenida en la galería experimental de Tarifa y su aplicación al túnel piloto del Estrecho de Gibraltar*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (1999). *Ensayos geotécnicos con muestras procedentes de la campaña Norskald-98*. Madrid.

Geocontrol (2005a). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados de los sondeos BH-18A y BH-18B*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005b). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo BH-3G*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005c). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo BH-3H*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005d). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo BH-3I*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005e). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo BH-10*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005f). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo BH-16*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005g). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo BH-17*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005h). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo BH-18*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005i). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo BH-19*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005j). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo BH-20*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005k). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo BH-21*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005l). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo BH-22*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005m). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo BH-23*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005n). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo PFM-5*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005o). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo PFM-6*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005p). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo PFM-7*. Informe técnico. Madrid.

Geocontrol (2005q). *Campaña de reconocimiento del estrecho de Gibraltar Kingfisher-05. Informe de resultados del sondeo PFM-8*. Informe técnico. Madrid.

- Gokceoglu, C.; Sonmez, H. y Kayabasi, A. (2003). Predicting the deformation moduli of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(5), 701-710.
- González de Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ortuno, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Prentice Hall.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics* (2nd ed.). New York: John Wiley and Sons.
- Green, A. E. y Zerna, W. (1968). *Theoretical elasticity* (2nd ed ed.). Oxford: Clarendon Press.
- Grujic, N. (1974). *Ultrasonic testing of foundation rock*. Proceedings of 3rd ISRM International Congress, Denver.
- Hamoumi, N. (1995). *Les ensembles géologiques de subsurface dan la région du puits Malabata: Etude sédimentologique et géochimique, essai de corrélation*. IV coloquio internacional sobre el enlace fijo del estrecho de Gibraltar., Sevilla.
- Hartmann, F. (1970). *Elastizitätstheorie des ausgekleideten Tunnelhohlraumes und des eingebohrten kreisförmigen Rohres* (Vol. 22): Strasse Brücke Tunnel.
- Hefny, A. M. y Lo, K. Y. (1999). Analytical solutions for stresses and displacements around tunnels driven in cross-anisotropic rocks. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 23(2), 161-177.
- Heidbach, O.; Tingay, M.; Barth, A.; Reinecker, J.; Kurfelß, D. y Müller, B. (2008). *The World Stress Map database release 2008 8*.
- Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering*: [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com).
- Hoek, E. y Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186.
- Hoek, E.; Carranza-Torres, C. y Corkum, B. (2002). *Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition*. Proceeding of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunnelling Association of Canada: NARMS-TAC, Toronto, Canada.
- Hoek, E. y Diederichs, M. S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2), 203-215.
- Honisch, K. (1995). Keynote lecture: Conclusions from 100 constructed power caverns for future planning. *Eurock 93/Lisboa/Portugal, Proceedings - Safety and Environmental Issues in Rock Engineering, Vol 2*, 1013-1027.
- Hutchinson, D. J. y Diederichs, M. S. (1996). *Cablebolting in underground mines*. Richmond, B.C.: BiTech Publishers.
- Ibáñez de Íbero, C. (1952). *El túnel del estrecho de Gibraltar. Presente y porvenir de la empresa*. Madrid: Instituto de Estudios Africanos.
- INGEMA (1997). *Puits experimental de Malabata. Note de synthese sur les essais géotechniques*. Informe técnico.
- Isik, N. S.; Doyuran, V. y Ulusay, R. (2008). Assessment of deformation modulus of weak rock masses from pressuremeter tests and seismic surveys. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(3), 293-304.
- ISRM (1974). *Suggested Methods for Determining Shear Strength. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests*. 23 pp.

ISRM (1981). Basic geotechnical description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 18(1), 85-110.

Itasca (2000). Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 4.0, Itasca Consulting Group: Inc.

Itasca Consulting Group, I. (2011). *3 Dimensional Distinct Element Code. 3DEC 4.1 Theory and Manual*. Minneapolis, USA.

Jasarevic, I. y Kovacevich, M. S. (1996). Analyzing applicability of existing classification for hard carbonate rock in mediterranean area *Proceedings of EUROCK'96* (pp. 811-818). Turin, Italia.

Jevenois, P. (1927). *El túnel submarino del estrecho de Gibraltar*. Madrid: Editorial Voluntad.

Jiménez Salas, J. A. y Justo Alpañes, J. L. (1971). *Geotécnia y cimientos I : propiedades de los suelos y de las rocas*. Madrid: Rueda.

Kawamoto, T. (1966). *On the Calculation of the Orthotropic Elastic Properties From the States of Deformation Around a Circular Hole Subjected to Internal Pressure In Orthotropic Elastic Medium*. 1st ISRM Congress, Lisbon, Portugal.

Kayabasi, A.; Gokceoglu, C. y Ercanoglu, M. (2003). Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(1), 55-63.

Khabbazi, A.; Ghafoori, M.; Lashkaripour, G. R. y Cheshomi, A. (2012). Estimation of the rock mass deformation modulus using a rock classification system. *Geomechanics and Geoengineering*, 8(1), 46-52.

Kiehl, J. R. y Wittke, W. (1983). *Ermittlung der verformbarkeit von anisotropem fels aus den ergebnissen von feldversuchen*. 5th ISRM Congress, April 10 - 15, Melbourne, Australia.

Kolymbas, D.; Wagner, P. y Blioumi, A. (2012). Cavity expansion in cross-anisotropic rock. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 36(2), 128-139.

Kulhawy, F. H. (1975). Stress deformation properties of rock and rock discontinuities. *Engineering Geology*, 9, 327-350.

Labrie, D.; Conlon, B.; Anderson, T. y Boyle, R. F. (2004). Measurement of in situ deformability in hard rock *Proceedings ISC-2 on geotechnical and geophysical site characterization* (pp. 963-970). Porto, Portugal.

Levy, M.; Olalla, C.; Perucho, A.; Santos, A. y Varona, P. (2008). *Projet du detroit de Gibraltar: Rapport sur l'etude des aspects géotechniques et géomecaniques et des reconnaissances futures, realisee par le groupement de bureaux d'etudes*.

Lisjak, A.; Grasselli, G. y Vietor, T. (2014). Continuum–discontinuum analysis of failure mechanisms around unsupported circular excavations in anisotropic clay shales. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 65(0), 96-115.

Lombardi, G.; Neuenschwander, M. y Panciera, A. (2009). Gibraltar Tunnel Project update – the geomechanical challenges. *Geomechanik und Tunnelbau*, 2(5), 578–590.

LPEE (1982). *Sondage Goe.5. Etude de fondation*. Informe técnico.

LPEE (1987). *Sondage Geo.6*. Informe técnico. Tanger (Marruecos).

LPEE (1993). *Projet Tanger-SNED. Essais de laboratoire*. Informe técnico.

LPEE (1994a). *Puits de Malabata. Essais au verin. Rapport d'essais*. Informe técnico. Tanger (Marruecos).

- LPEE (1994b). *Puits Malabata. Essais geotechniques et essais sur beton. Rapport mensuel No 1.* Informe técnico. Tanger (Marruecos).
- LPEE (1994c). *Puits Malabata. Essais geotechniques et essais sur beton. Rapport mensuel No 2.* Informe técnico. Tanger (Marruecos).
- LPEE (1994d). *Puits Malabata. Essais geotechniques et essais sur beton. Rapport mensuel No 3.* Informe técnico. Tanger (Marruecos).
- LPEE (1994e). *Puits Malabata. Essais geotechniques et essais sur beton. Rapport mensuel No 4.* Informe técnico. Tanger (Marruecos).
- LPEE (1994f). *Puits Malabata. Essais geotechniques et essais sur beton. Rapport mensuel No 5.* Informe técnico. Tanger (Marruecos).
- LPEE (1994g). *Puits Malabata. Essais geotechniques et essais sur beton. Rapport mensuel No 8.* Informe técnico. Tanger (Marruecos).
- LPEE (1994h). *Puits Malabata. Essais geotechniques et essais sur beton. Rapport mensuel No 9.* Informe técnico. Tanger (Marruecos).
- LPEE (1994i). *Puits Malabata. Essais geotechniques et essais sur beton. Rapport mensuel No 10.* Informe técnico. Tanger (Marruecos).
- LPEE (1994j). *Puits Malabata. Essais geotechniques et essais sur beton. Rapport mensuel No 11.* Informe técnico. Tanger (Marruecos).
- LPEE (1995a). *Liaison fixe detroit de Gibraltar. Essais au verin. Rapport.* Informe técnico. Tanger (Marruecos).
- LPEE (1995b). *Puits Malabata. Essais geotechniques et essais sur beton. Rapport mensuel No 12.* Informe técnico. Tanger (Marruecos).
- LPEE (1995c). *Puits Malabata. Essais geotechniques et essais sur beton. Rapport mensuel No 15.* Informe técnico. Tanger (Marruecos).
- LPEE (1995d). *Puits Malabata. Essais geotechniques et essais sur beton. Rapport mensuel No 16.* Informe técnico. Tanger (Marruecos).
- LPEE (1996a). *Puits de Malabata. Essais au verin. Rapport d'essais.* Informe técnico. Rabat.
- LPEE (1996b). *Puits de Malabata. Essais au verin. Rapport d'essais.* Informe técnico. Tanger (Marruecos).
- LPEE (1996c). *Puits de Malabata. Essais au verin. Tapport d'essais.* Informe técnico. Rabat.
- LPEE (1999). *Campagne d'essais geotechniques sur les carottes.* Informe técnico. Casablanca (Marruecos).
- Luján, M. (2003). *Estructura y cinemática de la Unidad del Aljibe (Complejo de Flyschs, Béticas). Ensayo de modelización analógica.* Tesis Doctoral, Universidad de Granada. 131 pp.
- Luján, M.; Crespo-Blanc, A. y Balanyá, J. C. (2006). The Flysch Trough thrust imbricate (Betic Cordillera): A key element of the Gibraltar Arc orogenic wedge. *Tectonics*, 25(6), n/a-n/a.
- Luján, M.; Storti, F.; Balanyá, J.-C.; Crespo-Blanc, A. y Rossetti, F. (2003). Role of décollement material with different rheological properties in the structure of the Aljibe thrust imbricate (Flysch Trough, Gibraltar Arc): an analogue modelling approach. *Journal of Structural Geology*, 25(6), 867-881.

- Martín Ruíz, M. (1997). *Estudio geotécnico de los materiales afectados por a galería experimental de Tarifa*. Informe técnico.
- Martín Ruíz, M. (1998). *Tunel del Estrecho de Gibraltar*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid. 96 pp.
- MECASOL (1996). *Puits experimental de Malabata. Note No 1. Résultats des essais de laboratoire*. Informe técnico. Le Plessis-Robinson (France).
- Mecsi, J. (2013). *Geotechnical Engineering examples and solutions using the cavity expanding theory (pressuremeters, piles, grouted soil anchors)*. Budapest, Hungary: Hungarian Geotechnical Society.
- Mehrotra, V. K. (1992). *Estimation of engineering parameters of rock mass*. Tesis Doctoral, Univesrity of Roorkee, Roorkee, India.
- Ménard, L. (1975). Interpretation and application of pressuremeter test results to foundation design. *Sols-Soils*, 26, 7-44.
- Mesquine, N. (1987). *Essais de gonflement sur échantillons d'argilites prélevées dans le sondage Geo.6 (Unite Mellousa). Rapport du satage*. Informe técnico. Rabat.
- Mitri, H. S.; Edriss, I. R. y Henning, J. (1994). Finite element modelling of cablebolted sotopes in hard rock ground mines *SME Annual Meeting* (pp. 94-116). Albuquerque, New MExico.
- Mohammadi, H. y Rahmamejad, R. (2010). The estimation of rock mass deformation modulus using regression and artificial neural networks analysis. *The Arabian journal for Science and Engineering*, 35(1A), 205-217.
- Muñiz, M.; Cano, H.; Pardo de Santayana, F. y Montero, N. (2012). Correlación entre la deformabilidad de la Unidad de Algeciras, estudiada mediante técnicas presiométricas, y sus características geomecánicas. SEMSIG (Ed.), *Cimentaciones y excavaciones profundas. 9º Simposio nacional de ingeniería geotécnica* (pp. 619-628). Sevilla.
- Muñiz Menéndez, M.; Cano Linares, H.; Pardo de Santayana Carrillo, F. y Sandoval Montero, N. (2013). Evaluation of the Deformation Modulus of Algeciras Flysch Unit by means of Pressuremeter Tests: Correlation with RMR *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Parallel session ISP-6*. Paris, Francia.
- Nicholson, G. y Bieniawski, Z. T. (1990). A non-linear deformation modulus based on rock mass classification. *International Journal of Minning and Geological Engineering*, 8, 181-202.
- Olalla, C. y Sopeña, L. (1991). *Ensayos de campo. Monografía nº5. Master en Ingeniería Geológica*. Madrid: Departamento de Geodinámica. UCM.
- Palmstrom, A. (1996a). Characterizing rock masses by the R<sub>Mi</sub> for use in practical rock engineering .1. The development of the Rock Mass index (R<sub>Mi</sub>). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(2), 175-188.
- Palmstrom, A. (1996b). Characterizing rock masses by the R<sub>Mi</sub> for use in practical rock engineering .2. Some practical applications of the Rock Mass index (R<sub>Mi</sub>). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(3), 287-303.
- Palmström, A. (1995). *R<sub>Mi</sub> – a rock mass characterization system for rock engineering purposes*. Tesis Doctoral, Oslo University, Oslo, Norway. 400 pp.
- Palmstrom, A. y Singh, R. (2001). The deformation modulus of rock masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(2), 115-131.
- Panciera, A.; Bensaid, A. y Roca, F. (2010). *The Gibraltar Tunnel – The Design Revision*. World Tunnel Congress, Vancouver, Canada.

- Pedrerá, A.; Ruiz-Constán, A.; Galindo-Zaldívar, J.; Chalouan, A.; Sanz de Galdeano, C.; Marín-Lechado, C.; Ruano, P.; Benmakhlouf, M.; Akil, M.; López-Garrido, A. C.; Chabli, A.; Ahmamou, M. y González-Castillo, L. (2011). Is there an active subduction beneath the Gibraltar orogenic arc? Constraints from Pliocene to present-day stress field. *Journal of Geodynamics*, 52(2), 83-96.
- Pendon, J. G. (1978). *Sedimentación turbidítica en las unidades del Campo de Gibraltar*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Granada (España). 261 pp.
- Peña Boeuf, A. (1956). El paso a través del estrecho de Gibraltar. *Revista de Obras Públicas*, 104(2893), 264-269.
- Perez Moreno, P. (1991). *La geotecnia en el proyecto de enlace fijo a través del estrecho de Gibraltar. Período 1981-1990*.
- Perucho, A.; Muñiz, M. y Díez, J. A. (2014). Geotechnical characterization of low strength anisotropic rocks in the Strait of Gibraltar area. Alejano, et al. (Eds.), *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses. Eurock 2014* (pp. 325-331). Vigo: CRC Press.
- Perucho, A.; Muñiz, M.; Díez, J. A. y Sandoval, N. (2012). Caracterización geotécnica de diversas formaciones anisótropas de la Unidad de Algeciras mediante ensayos de laboratorio. Resistencia y deformabilidad en diferentes direcciones. SEMSIG (Ed.), *Cimentaciones y excavaciones profundas. 9º Simposio nacional de ingeniería geotécnica* (pp. 647-665). Sevilla.
- Plaxis, B. (2004). PLAXIS 2D Version 8.2-Finite element code for soil and rock analysis. AA Balkema, Delft.
- Pliego Gonzalez, J. M.; García Gonzalez, E. y Esteras Martín, M. (1992). *Proyecto del pozo experimental de Bolonia*. Informe técnico.
- Pliego, J. (2005a). Open session - The Gibraltar Strait tunnel. An overview of the study process. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(6), 558-569.
- Pliego, J. M. (2005b). Open Session – The Gibraltar Strait tunnel. An overview of the study process. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(6), 558-569.
- Puertos-del-Estado (2006). *ROM 0.5-05 Recomendaciones geotécnicas para obras marítimas y portuarias*. [Madrid]: Puertos del Estado.
- Ramamurthy, T. (1993). Strength and modulus responses of anisotropic rocks. *Comprehensive rock engineering*, 1, 313-329.
- Read, S. A. L.; Richard, L. R. y Perrin, N. D. (1999). Applicability of the Hoek-Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks. Vouille, et al. (Eds.), *Proceedings of the 9th international congress on rock mechanics* (Vol. 2, pp. 655-660). Paris.
- Rocscience-Inc. (2006). *Phase2 Version 6.0 - Finite Element Analysis for Excavations and Slopes*. [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com). Toronto, Ontario, Canada.
- Rocscience-Inc. (2010). *Phase2 Version 7.0 - Finite Element Analysis for Excavations and Slopes*. [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com). Toronto, Ontario, Canada.
- Romana, M. (1999). *Correlation between uniaxial compressive and point-load (Franklin test) strengths for different rock classes*.
- Romana, M. (2002). Determination of deformation modulus of rock masses by means of geomechanical classification *Proceedings of EUROCK'02 international symposium* (pp. 317-325). Madeira island, Portugal: Sociedade Portuguesa de Geotecnia.
- Sandoval, N.; Roca, F. y Sauras, J. M. (2011). Proyecto de túnel ferroviario a través del estrecho de Gibraltar. *Aljaranda*, 80, 20-34.



- Saroglou, H. y Tsiambaos, G. (2007). Classification of anisotropic rocks. *Proceedings 11th International Congress of ISRM* (Vol. 1, pp. 191-196). Lisboa.
- Schneider, H. R. (1999). *Definition and determination of characteristics soil properties*. Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Proceedings.
- SEACORE (2005). *Strait of Gibraltar drilling campaign IV. Technical report* (Vol. I - II). Cornwall.
- SECEG (1981). *Estudio monográfico sobre la geología del Estrecho de Gibraltar. Informe interno*. Madrid.
- SECEG (1983a). *1ª Campaña de sondeos mecánicos de reconocimiento en los flysch del campo de Gibraltar. Informe geológico*. Informe técnico. Madrid.
- SECEG (1983b). *1ª Campaña de sondeos mecánicos de reconocimiento en los flyschs del Campo de Gibraltar. Informe técnico*. Vol. I, II y III, Informe técnico. Madrid.
- SECEG (1984). *Boletín informativo de la Sociedad española de estudios para la comunicación fija a través del estrecho de Gibraltar*. Madrid.
- SECEG (1990). *Mapa tectónico del arco de Gibraltar*. Madrid.
- SECEG (1991). *Campaña de sondeos cortos 91. Informe de desarrollo. Periodo agosto-noviembre 1991*. Informe técnico. Madrid.
- SECEG (1992). *Campaña-test de sondeos cortos "Pholas-92". Informe de desarrollo*. Informe técnico. Madrid.
- SECEG (1994a). *Campaña de sondeos marinos cortos KT-94. Buque oceanográfico Kommandor Therese. Informe geológico*. Informe técnico. Madrid.
- SECEG (1994b). *Campaña oceanográfica Kommandor Therese-94. Informe de desarrollo*. Madrid.
- SECEG (1994c). *Campañas de sondeos marinos cortos SN-91 y PH-92. Informe geológico*. Madrid.
- SECEG (1994d). *Pozo experimental de Bolonia. Datos geológicos*. Informe técnico. Madrid.
- SECEG (1994e). *Pozo experimental de Bolonia. Recopilación de los datos de la auscultación*. Informe técnico. Madrid.
- SECEG (1995). *Campaña de sondeos marinos profundos BV-95. Buque oceanográfico Bavenit*. Informe técnico. Madrid.
- SECEG (1996). *Enlace fijo del Estrecho de Gibraltar*. Vol. 1 - Medio físico, 118 pp. Informe técnico. Madrid.
- SECEG (1997a). *Campaña Bucentaur-97 de sondeos profundos en el estrecho de Gibraltar. Informe de desarrollo*. Informe técnico. Madrid.
- SECEG (1997b). *Campaña Bucentaur-97 de sondeos profundos en el estrecho de Gibraltar. Informe geológico*. Informe técnico. Madrid.
- SECEG (1998). *Mapa geológico del estrecho de Gibraltar. Orilla Norte. Escala 1:100.000*. 1ª Edición.
- SECEG (1999a). *Campaña Norskald-98 de sondeos profundos en el estrecho de Gibraltar. Informe de desarrollo*. Informe técnico. Madrid.
- SECEG (1999b). *Campaña Norskald-98 de sondeos profundos en el estrecho de Gibraltar. Informe Geológico*. Madrid.

- SECEG (2000). *Nota sobre la clausura del Pozo de Bolonia*. In Esteras (Ed.), Informe técnico. Madrid.
- SECEG (2001). *Informe sobre los ensayos geotécnicos realizados sobre muestras de las diferentes formaciones geológicas presentes en el estrecho de Gibraltar*. Informe técnico. Madrid.
- SECEG (2003). *Memoria del mapa geológico del estrecho de Gibraltar Escala 1:25.000. Orilla Norte*. Madrid.
- SECEG (2008). *Mapa geológico del Estrecho de Gibraltar. Orilla Norte. Escala 1:100.000: 2ª Edición revisada*.
- SECEG; SNED y IEO (1990). *Mapa geológico del estrecho de Gibraltar. Escala 1:200.000*.
- Serafim, J. L. y Pereira, J. P. (1983). *Considerations of the Geomechanics Classification of Bieniawski*.
- Serrano, A. (1998). *Mecánica de las rocas. 2, Propiedades de las rocas*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.
- Serrano, A. (2001). *La mecánica de las rocas: ESTI Caminos, Canales y Puertos*. Univ. Politécnica de Madrid.
- Serrano, A.; Olalla, C. y Perucho, A. (2002). *Evaluation Of Non-Linear Strength Laws For Volcanic Agglomerates*. ISRM International Symposium - EUROCK 2002, Madeira, Portugal.
- SETEC-TPI (1997). *Puits de Malabata. Analyse des donnees geotechniques et interpretations des resultats des mesures effectuees dans les galeries a -146,5 et a -300 m*. Informe técnico.
- Shen, J.; Karakus, M. y Xu, C. (2012). A comparative study for empirical equations in estimating deformation modulus of rock masses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32, 245-250.
- SIMECSOL (1997). *Puits de Malabata. Essais pressiometriques et essais au vérin plat*. Informe técnico.
- Singh, R. y Bashin, R. (1996). Q-System and deformability of rock masses *Proceedings of conference on recent advances in tunnelling technology* (pp. 57-67). New Delhi, India.
- Skinner, A. C. y Gillespie, E. J. (1994). *Report on the 1994 Shallow Coring Campaign in the Strait of Gibraltar on Behalf of SECEG and SNED* In British Geological Survey (Ed.), *BGS Technical Report WB/94/19C, Marine Reports Series*. Informe técnico.
- SNED (1983). *Dones geotechniques preesistantes de laboratoire (Unité de Melloussa du site du Barrage Ibn Battouta)*. Informe técnico. Rabat (Marruecos).
- SNED (1984a). *Dones pressiometriques (Unité de Melloussa du site du Barrage Ibn Battouta)*. Informe técnico. Rabat (Marruecos).
- SNED (1984b). *Donnees geotechniques de l'unité de Beni-Ilder. Sondage Geo.5*. Informe técnico. Rabat (Marruecos).
- SNED (1987a). *Note sur les essais du gonflement des argilites intactes du Geo.6 (Melloussa)*. Informe técnico. Rabat (Marruecos).
- SNED (1987b). *Notes sur les caracteristiques geotechniques des roches du site du project de la liason fixe. Sondages Geo.3 y Geo.5*. Informe técnico. Rabat (Marruecos).
- SNED (1991a). *Campagne de sondages courts dans le detroit de Gibraltar. Rapport de mission*. Informe técnico. Rabat (Marruecos).
- SNED (1991b). *Campagne de sondages courts dans le detroit de Gibraltar. Rapport de mission de la deuxieme etape*. Informe técnico. Rabat (Marruecos).

SNED (1992). *Campagne forages Test-92 Pholas dans le detroit de Gibraltar. Rapport de mission*. Informe técnico. Rabat (Marruecos).

SNED (1996). Le puits experimental de Malabata. Galerie sous-marine niveau -300. Note de chantier sur la section d'essai blindée.

SNED (1997). *Campagne Bucentaur-97. Forages en mer*. Informe técnico. Rabat (Marruecos).

Soergel, H. (1929). *Mittelmeer-Senkung; Sahara-Bewässerung (Panropa-Projekt) ... Lowering the Mediterranean; irrigating the Sahara (Panropa project)*. Leipzig: J.M. Gebhardt.

Sonmez, H.; Gokceoglu, C.; Nefeslioglu, H. A. y Kayabasi, A. (2006). Estimation of rock modulus: For intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2), 224-235.

Sonmez, H.; Gokceoglu, C. y Ulusay, R. (2004). Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses based on the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(5), 849-857.

Stephens, R. E. y Banks, D. C. (1989). *Moduli for deformation studies of the foundation and abutments of the Portugues Dam - Puerto Rico*. Rock Mechanics as a Guide for Efficient Utilization of Natural Resources: Proceedings of the 30th U.S. Symposium, Morgantown.

Terzaghi, K. (1963). Discussion of an approach to rock mechanics *Proceedings of ASCE* (Vol. 89, pp. 295-300): SMI.

Thom, H. C. S. (1958). A note on the Gamma distribution. *Monthly Weather Review*, 86(4), 117-122.

Trunk, U. y Floss, R. (1991). Verwendung von vorinformationen bei der planung von krafthauskavernen im fels *Proceedings of 7th International Congress in Rock Mechanis* (pp. 1223-1226). Aachen: A.A. Balkema.

Tsidzi, K. (1997). Propagation characteristics of ultrasonic waves in foliated rocks. *Bulletin of the International association of engineering geology*, 56, 101-113.

UNIOVI (1987). *Determinación del umbral de microfisuración mecánica de la "intact rock" del enlace de Gibraltar*. 45 pp. Informe técnico. Oviedo.

Vera Torres, J. A. (2004). *Geología de España*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Verman, M.; Singh, B.; Viladkar, M. N. y Jethws, J. L. (1997). Effect of tunnel depth on modulus of deformation of rock mass. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 30(3), 121-127.

Vogel, C. (1996). *Tunnel du détroit de Gibraltar. Etude des mesures de convergence au pus de Bolonia (Espagne)*. Tesis.

Wang, T.-T. y Huang, T.-H. (2013). Anisotropic Deformation of a Circular Tunnel Excavated in a Rock Mass Containing Sets of Ubiquitous Joints: Theory Analysis and Numerical Modeling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(2), 643-657.

Wang, T. y Huang, T. (2009). A constitutive model for the deformation of a rock mass containing sets of ubiquitous joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), 521-530.

Wittke, W. (1990). *Rock mechanics : theory and applications with case histories*. Berlin ; New York: Springer-Verlag.

Zhang, L. y Einstein, H. H. (2004). Using RQD to estimate the deformation modulus of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(2), 337-341.

# INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Porcentaje de la traza del futuro túnel excavada en cada una de las unidades .....	37
Tabla 3-1. Tipos de sostenimiento utilizados (Geocontrol, 1995c).....	58
Tabla 3-2. Sondeos pertenecientes a la campaña 1982-1983.....	64
Tabla 3-3. 1º Campaña de sondeos en tierra de Marruecos. ....	71
Tabla 3-4. 2ª Campaña de sondeos en tierra de Marruecos .....	71
Tabla 3-5. Campaña de sondeos submarinos Sea Nautilus-1991.....	72
Tabla 3-6. Campaña de sondeos submarinos Pholas-1992 .....	74
Tabla 3-7. Campaña de sondeos submarinos Kommander Therese-1994 (Skinner y Gillespie, 1994). ....	75
Tabla 3-8. Campaña de sondeos submarinos Bavenit (1995) (SECEG, 1995).....	78
Tabla 3-9. Campaña de sondeos submarinos Bucentaur-1997.....	79
Tabla 3-10. Campaña de sondeos submarinos Norskald (1998-99).....	81
Tabla 3-11. Campaña de sondeos submarinos Kingfisher (2005). ....	84
Tabla 3-12. Ensayos presiométricos realizados en el el pozo y galerías de Malabata. ....	90
Tabla 3-13. Módulos de deformación calculados a partir de los ensayos presiométricos.....	91
Tabla 3-14. Ensayos presiométricos realizados durante la perforación de la galería de Tarifa. ....	91
Tabla 3-15. Resultados de los ensayos de carga con placa en el complejo de Malabata. ....	92
Tabla 3-16. Resultados de los ensayos de gato plano realizados en Malabata. ....	93
Tabla 3-17. Ensayos de carga con <i>grippers</i> realizados durante la perforación de la galería de Tarifa .....	94
Tabla 3-18. Resultados de los ensayos Lugeon realizados en la 2ª campaña de sondeos en Marruecos (CMS, 1992). Los materiales pertenecen a la Unidad de Algeciras. ....	94
Tabla 3-19. Resultados de los ensayos Lefranc realizados en la 2ª campaña de sondeos en Marruecos (CMS, 1992). Los materiales pertenecen a la Unidad de Algeciras.....	95
Tabla 3-20. Resultados de los ensayos de carga con placa realizados en la Z-V (CEDEX, 1987a).....	96
Tabla 3-21. Resultados de los ensayos de carga con placa realizados en la Z-V (CEDEX, 1987a).....	96
Tabla 3-22. Resultados de los ensayos Lugeon realizados en la campaña de sondeos de 1982-1983 (SECEG, 1983b).....	98
Tabla 3-23. Resultados de los ensayos de densidad <i>in situ</i> realizados en el emplazamiento Z-V (CEDEX, 1987a).....	99

Tabla 3-24. Resultados de los ensayos de densidad <i>in situ</i> realizados en el emplazamiento Z-VI (CEDEX, 1987a).	99
Tabla 3-25. Ensayos de densidad <i>in situ</i> realizados en Malabata por el LPEE.	99
Tabla 3-26. Ensayos de densidad <i>in situ</i> realizados en Malabata por MECASOL.	100
Tabla 3-27. Resultados de la campaña presiométrica CEDEX-1983.	101
Tabla 3-28. Ensayos presiométricos realizados durante la perforación de la galería de Tarifa (García González, 1996).	101
Tabla 3-29. Resultados de los ensayos de carga con placa realizados en la Z-I.	102
Tabla 3-30. Resultados de los ensayos de carga en placa realizados en la Z-III.	103
Tabla 3-31. Resultados de los ensayos de carga con placa realizados en la Z-IV.	104
Tabla 3-32. Ensayos de carga con <i>grippers</i> realizados durante la perforación de la galería de Tarifa.	105
Tabla 3-33. Resultados de los ensayos Lugeon realizados en la Unidad de Almarchal dentro de la campaña de sondeos 1982-1983 (SECEG, 1983b).	108
Tabla 3-34. Ensayos de permeabilidad realizados en materiales de la Unidad Almarchal en el interior de la Galería de Tarifa (SECEG, 2001).	109
Tabla 3-35. Resultados de los ensayos de densidad <i>in situ</i> realizados en el emplazamiento Z-I (CEDEX, 1985a).	109
Tabla 3-36. Resultados de los ensayos de densidad <i>in situ</i> realizados en el emplazamiento Z-III (tomados de CEDEX, 1985b).	110
Tabla 3-37. Resultados de los ensayos de densidad <i>in situ</i> realizados en el emplazamiento Z-IV (tomados de CEDEX, 1985b).	110
Tabla 3-38. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras del sondeo Geo.5 (LPEE, 1982).	111
Tabla 3-39. Ensayos de identificación realizados sobre muestras de los sondeos Geo.5 (SNED, 1984b).	111
Tabla 3-40. Ensayos edométricos realizados en muestras del Geo.5 (SNED, 1984b).	112
Tabla 3-41. Resultados de los ensayos realizados en el CEDEX sobre muestras de la Unidad de Algeciras (CEDEX, 1983a, 1984).	112
Tabla 3-42. Resultados de los ensayos de resistencia a compresión simple realizados sobre muestras de la Unidad de Algeciras (CEDEX, 1983a, 1984).	113
Tabla 3-43. Ensayos de resistencia realizados sobre muestras de los sondeos Geo.3 (SNED, 1987b).	113
Tabla 3-44. Resultados de los ensayos de microfisuración mecánica (UNIOVI, 1987).	113
Tabla 3-45. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-1 (LPEE, 1993).	114
Tabla 3-46. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-2 (LPEE, 1993).	114
Tabla 3-47. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-3 (LPEE, 1993).	114
Tabla 3-48. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-4 (LPEE, 1993).	114

Tabla 3-49. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-5 (LPEE, 1993).....	114
Tabla 3-50. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-6 (LPEE, 1993).....	115
Tabla 3-51. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-7 (LPEE, 1993).....	115
Tabla 3-52. Ensayos de laboratorio realizados sobre muestras procedentes del SB-10 (LPEE, 1993)...	115
Tabla 3-53. Ensayos realizados sobre muestras procedentes de la Galería de Tarifa (Geocontrol, 1995a). .....	116
Tabla 3-54. Ensayos de resistencia realizados sobre muestras de la Galería de Tarifa pertenecientes al flysch margo-areniscoso micáceo (Geocontrol, 1995a).....	116
Tabla 3-55. Ensayos de resistencia realizados sobre muestras de la Galería de Tarifa pertenecientes a la sucesión de pelitas rojas (Geocontrol, 1995a). ....	117
Tabla 3-56. Ensayos de resistencia al corte en discontinuidades realizados en muestras de la Galería de Tarifa (Geocontrol, 1995a). ....	118
Tabla 3-57. Parámetros representativos de los ensayos de laboratorio realizados en el Pozo de Malabata (INGEMA, 1997). ....	118
Tabla 3-58. Resultados de los ensayos de estado e identificación (CEDEX, 1983a, 1984). ....	119
Tabla 3-59. Resultados de los ensayos de resistencia (CEDEX, 1983a, 1984).....	120
Tabla 3-60. Resultados de los ensayos de microfisuración mecánica (UNIOVI, 1987). ....	120
Tabla 3-61. Resultados de los ensayos de estado e identificación (CEDEX, 1987b). ....	121
Tabla 3-62. Resultados de los ensayos de identificación realizados a muestras del sondeo Geo.6 (LPEE, 1987). ....	121
Tabla 3-63. Ensayos edométricos realizados a muestras del sondeo Geo.6 (LPEE, 1987). ....	122
Tabla 3-64. Resultados de los ensayos de identificación (CEDEX, 1983a, 1984).....	122
Tabla 3-65. Resultados de los ensayos de desmoronamiento SEHUDES (CEDEX, 1983a, 1984). ....	123
Tabla 3-66. Resultados de los ensayos de resistencia (CEDEX, 1983a, 1984). ....	123
Tabla 3-67. Resultados de los ensayos de identificación (CEDEX, 1986). ....	124
Tabla 3-68. Resultados de los ensayos de hinchamiento (CEDEX, 1986).....	124
Tabla 3-69. Resultados de los ensayos de resistencia al corte directo (CEDEX, 1986). ....	124
Tabla 3-70. Resultados de los ensayos de microfisuración mecánica (UNIOVI, 1987). ....	125
Tabla 3-71. Ensayos de identificación realizados en muestras del Pozo de Bolonia (Geocisa, 1993).....	125
Tabla 3-72. Ensayos de resistencia al corte directo en muestras del Pozo de Bolonia (Geocisa, 1993).	126
Tabla 3-73. Parámetros resistentes medios de las muestras en función de su orientación (SECEG, 2001). .....	127
Tabla 3-74. Ensayos de estado realizados sobre materiales de la galería de Tarifa (Geocontrol, 1998).	127

Tabla 3-75. Ensayos de identificación realizados sobre muestras de la Galería de Tarifa (Geocontrol, 1998).....	127
Tabla 3-76. Ensayos de resistencia a compresión simple en muestras de la galería de Tarifa (SECEG, 2001).....	128
Tabla 3-77. Ensayos de resistencia a compresión triaxial realizados sobre muestras de la Galería de Tarifa (Geocontrol, 1998).....	129
Tabla 3-78. Ensayos de identificación (LPEE, 1999).....	130
Tabla 3-79. Determinación de la plasticidad (CEDEX, 1999).....	131
Tabla 3-80. Parámetros de estado (CEDEX, 1999).....	131
Tabla 3-81. Ensayos de resistencia a compresión simple (CEDEX, 1999).....	132
Tabla 3-82. Ensayos de resistencia a compresión triaxial (CEDEX, 1999).....	132
Tabla 3-83. Módulos de deformación obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión triaxiales (CEDEX, 1999).....	132
Tabla 3-84. Deformabilidad en función de la presión de confinamiento (CEDEX, 1999).....	133
Tabla 3-85. Ensayos de extensión triaxial (CEDEX, 1999).....	133
Tabla 3-86. Ensayos de resistencia al corte directo (CEDEX, 1999).....	133
Tabla 3-87. Ensayos de permeabilidad (CEDEX, 1999).....	133
Tabla 3-88. Valores representativos del estudio (CEDEX, 1999).....	133
Tabla 3-89. Ensayos de estado e identificación (Geocontrol, 1999).....	134
Tabla 3-90. Ensayos de permeabilidad (Geocontrol, 1999).....	134
Tabla 3-91. Valores representativos de la campaña de ensayos de laboratorio (Geocontrol, 1999).....	135
Tabla 3-92. Resultados de los ensayos de compresión triaxial con medida de presión de poro (Dong <i>et al.</i> , 2013).....	136
Tabla 3-93. Resultados de los ensayos de identificación (CEDEX, 2005).....	137
Tabla 3-94. Resultado de los ensayos de resistencia a compresión triaxial (CEDEX, 2005).....	137
Tabla 3-95. Ensayos de permeabilidad (CEDEX, 2005).....	137
Tabla 3-96. Ensayos de porosidad con mercurio (CEDEX, 2005).....	137
Tabla 3-97. Ensayos realizados por CEPASA (2005).....	138
Tabla 4-1. Relación de sondeos perforados en la campaña CEDEX-SECEG 2012.....	143
Tabla 4-2. Resumen del número de ensayos presiométricos realizados.....	145
Tabla 4-3. Resultados de los ensayos presiométricos tipo OYO y de la calidad geomecánica ( $RMR_b$ ) obtenida a partir de los sondeos.....	146
Tabla 4-4. Valores del coeficiente $\alpha$ (Ménard, 1975).....	147

Tabla 4-5: Muestras ensayadas. ....	149
Tabla 4-6: Ensayos de laboratorio realizados. ....	149
Tabla 4-7: Clasificación de anisotropía según la velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas (Tsidzi, 1997). ....	152
Tabla 4-8: Clasificación de anisotropía según la velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas (Saroglou y Tsiambaos, 2007). ....	152
Tabla 4-9: Clasificación de anisotropía según la resistencia a compresión simple (Ramamurthy, 1993). ....	153
Tabla 4-10: Resumen de los resultados de los ensayos de identificación y propiedades índice en el Flysch margo-areniscoso-micáceo (Zona 1). ....	153
Tabla 4-11: Resultados de los ensayos de resistencia a compresión simple (RCS) y triaxial, de los ensayos de deformabilidad y de los ensayos de determinación de la velocidad de transmisión de las ondas de compresión ( $v_p$ ) y de corte ( $v_s$ ) en el flysch margo-areniscoso-micáceo (Zona 1). ....	154
Tabla 4-12: Resultados de los ensayos edométricos realizados en el flysch margo-areniscoso-micáceo (Zona 1). ....	156
Tabla 4-13: Resultados de los ensayos de resistencia a tracción (ensayo brasileño) y a carga puntual en el flysch margo-areniscoso-micáceo (Zona 1). ....	156
Tabla 4-14: Resultados del ensayo SEHUEDS en la Zona 1 (flysch margo-areniscoso-micáceo). ....	157
Tabla 4-15: Resultados del ensayo de permeabilidad en la Zona 1 (flysch margo-areniscoso-micáceo). ....	157
Tabla 4-16: Resumen de los resultados de los ensayos de identificación y propiedades índice en las pelitas rojas (Zona 2). ....	157
Tabla 4-17: Resultados de los ensayos de resistencia y deformabilidad en las Pelitas Rojas (Zona 2). ....	158
Tabla 4-18: Resultados de los ensayos edométricos realizados en las Pelitas Rojas (Zona 2). ....	159
Tabla 4-19: Resultados de los ensayos de resistencia a tracción (ensayo brasileño) y a carga puntual en las pelitas rojas (Zona 2). ....	160
Tabla 4-20. Resultados de los ensayos de corte directo en discontinuidades realizados en las pelitas rojas ....	160
Tabla 4-21: Resultados del ensayo SEHUEDS en la Zona 2 ....	161
Tabla 4-22: Resultados del ensayo de permeabilidad en la Zona 2 (pelitas rojas). ....	161
Tabla 4-23: Resumen de los resultados de los ensayos de identificación y propiedades índice en el flysch calcáreo (Zona 3). ....	162
Tabla 4-24: Resultados de los ensayos de resistencia a compresión simple (RCS), de los ensayos de deformabilidad y de los ensayos de determinación de la velocidad de transmisión de las ondas de compresión ( $v_p$ ) y de corte ( $v_s$ ) en el flysch calcáreo (Zona 3). ....	162
Tabla 4-25: Resultados de los ensayos edométricos realizados en el flysch calcáreo (Zona 3). ....	163
Tabla 4-26: Resultados de los ensayos de resistencia a tracción (ensayo brasileño) y a carga puntual en el flysch calcáreo (Zona 3). ....	163
Tabla 4-27: Resultados del ensayo de permeabilidad en la Zona 3 (flysch calcáreo). ....	164



Tabla 4-28: Valores medios de los principales parámetros obtenidos en esta campaña .....	164
Tabla 5-1. Coeficiente de variación recomendado por la ROM 0.5-05 (Puertos del Estado, 2006) para algunos parámetros geotécnicos.....	180
Tabla 5-2. Ponderación de cada una de las variables utilizadas para la determinación de la certidumbre. ....	183
Tabla 5-3. Grado de certidumbre .....	183
Tabla 5-4. Resumen de parámetros evaluados en cada unidad.....	184
Tabla 5-5. Peso específico de la Unidad de Algeciras por litologías.....	185
Tabla 5-6. Densidad aparente <i>in situ</i> de los materiales arcillosos de la Unidad de Algeciras.....	186
Tabla 5-7. Índice de plasticidad de los materiales arcillosos de la Unidad de Algeciras.....	187
Tabla 5-8. Resistencia a compresión simple de los materiales de la Unidad de Algeciras.....	188
Tabla 5-9. Módulo de Young de la matriz rocosa de los materiales de la Unidad de Algeciras. ....	189
Tabla 5-10. Coeficiente de Poisson de los materiales de la Unidad de Algeciras. ....	191
Tabla 5-11. Resistencia a carga puntual de los materiales de la Unidad de Algeciras.....	192
Tabla 5-12. Resistencia a tracción indirecta de los materiales de la Unidad de Algeciras .....	193
Tabla 5-13. Cohesión y ángulo de rozamiento interno de las litologías arcillosas de la Unidad de Algeciras.....	195
Tabla 5-14. Velocidad de propagación de las ondas “p” de los materiales de la Unidad de Algeciras.....	197
Tabla 5-15. Velocidad de propagación de las ondas “s” de los materiales de la Unidad de Algeciras.....	197
Tabla 5-16. Módulo elástico dinámico de la matriz rocosa de los materiales de la Unidad de Algeciras. ....	198
Tabla 5-17. Módulo presiométrico de los materiales de la Unidad de Algeciras. ....	200
Tabla 5-18. Módulo de deformación con <i>grippers</i> de los materiales de la Unidad de Algeciras .....	201
Tabla 5-19. Hinchamiento de las litologías arcillosas de la Unidad de Algeciras. ....	201
Tabla 5-20. Valores representativos de los ensayos SeHuDes en la Unidad de Algeciras. ....	202
Tabla 5-21. Ensayos de permeabilidad <i>in situ</i> de la Unidad de Algeciras.....	203
Tabla 5-22. Peso específico seco de la Unidad de Bolonia por litologías. ....	204
Tabla 5-23. Densidad <i>in situ</i> de los materiales arcillosos de la Unidad de Bolonia. ....	205
Tabla 5-24. Índice de plasticidad de la Unidad de Bolonia por litologías .....	205
Tabla 5-25. Resistencia a compresión simple de la Unidad de Bolonia por litologías. ....	207
Tabla 5-26. Resistencia a la carga puntual de Unidad de Bolonia por litologías .....	207
Tabla 5-27. Valores representativos de los ensayos de carga con placa realizados en la Unidad de Bolonia. ....	208

Tabla 5-28. Hinchamiento de las diferentes litologías de la Unidad de Bolonia. ....	209
Tabla 5-29. Valores representativos de los ensayos SeHuDes en la Unidad de Bolonia. ....	210
Tabla 5-30. Peso específico de la Unidad de Facinas.....	211
Tabla 5-31. Datos de plasticidad de la Unidad de Facinas.....	211
Tabla 5-32. Parámetros representativos de los ensayos presiométricos realizados en la Unidad de Facinas.....	213
Tabla 5-33. Ensayos edométricos de la Unidad de Facinas.....	215
Tabla 5-34. Parámetros de estado de la Unidad Almarchal. ....	216
Tabla 5-35. Densidad <i>in situ</i> de los materiales de la Unidad de Almarchal.....	217
Tabla 5-36. Contenido en finos de la Unidad de Almarchal.....	217
Tabla 5-37. Índice de plasticidad de la Unidad de Almarchal. ....	218
Tabla 5-38. Ensayos de compresión uniaxial y carga puntual en la Unidad de Almarchal. ....	220
Tabla 5-39. Ensayos triaxiales UU realizados en muestras de la Unidad de Almarchal. ....	223
Tabla 5-40. Ensayos de resistencia al corte directo en muestras del Almarchal arcilloso. ....	223
Tabla 5-41. Ensayos de resistencia al corte directo <i>in situ</i> en la Unidad de Almarchal. ....	225
Tabla 5-42. Ensayos de deformabilidad <i>in situ</i> en la Unidad de Almarchal.....	226
Tabla 5-43. Valores medios de la relación entre módulos iniciales y de recarga en la Unidad de Almarchal. ....	226
Tabla 5-44. Valores de hinchamiento de la Unidad de Almarchal.....	227
Tabla 5-45. Ensayos de permeabilidad <i>in situ</i> de la unidad de Almarchal. ....	228
Tabla 5-46. Parámetros de estado de las Brechas. ....	229
Tabla 5-47. Datos de plasticidad de las Brechas. ....	230
Tabla 5-48. Parámetros resistentes y deformacionales de las Brechas.....	231
Tabla 5-49. Ensayos de permeabilidad <i>en laboratorio</i> de las brechas.....	233
Tabla 5-50. Peso específico de las arenas bioclásticas. ....	234
Tabla 5-51. Granulometría de las arenas bioclásticas.....	234
Tabla 5-52. Parámetros resistentes según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb de las Arenas bioclásticas (CEDEX, 2005). ....	235
Tabla 5-53. Ensayos de permeabilidad en laboratorio de las arenas bioclásticas.....	235
Tabla 6-1. Valores del coeficiente $\alpha$ . Según Ménard (1975).....	252
Tabla 6-2. Cálculos realizados para la comparación entre modelos continuos y discontinuos. ....	278

Tabla 6-3. Caso i: $E_1/E_2 = 3$ . Modelos calculados y parámetros utilizados.....	280
Tabla 6-4. Caso ii: $E_1/E_2 = 2$ . Modelos calculados y parámetros utilizados. ....	280
Tabla 6-5. Caso iii: $E_1/E_2 = 1,33$ . Modelos calculados y parámetros utilizados. ....	281
Tabla 6-6. Métodos recomendables en la modelización de ensayos de expansión cilíndrica en medios fisurados en función de $\lambda/R$ .....	288
Tabla 6-7. Errores de cálculo entre el modelo propuesto y los parámetros de entrada.....	304

# INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Sección transversal de la solución puente propuesta por Jevenois (1927). .....	16
Figura 1-2. Diferentes alternativas de trazado contempladas en los primeros estudios del proyecto. ....	16
Figura 1-3. Sección transversal del túnel excavado propuesto (modificado de SECEGSA, 1996). .....	17
Figura 2-1. Mapa esquemático de situación de la zona de estudio. ....	23
Figura 2-2. Mapa geológico del segmento occidental del Orógeno Alpino Perimediterráneo (Vera Torres, 2004). .....	25
Figura 2-3. Esquema tectónico de la subdivisión y relaciones tectónicas del Complejo del Campo de Gibraltar en el sector occidental de la Cordillera Bética (Vera Torres, 2004). .....	26
Figura 2-4. Evolución paleogeográfica de la Cordillera Bética y dominios adyacentes desde el Cretácico hasta la actualidad (Vera Torres, 2004). .....	28
Figura 2-5. Columnas litoestratigráficas simplificadas de las Unidades del Complejo de los Flyschs. Tomadas de Luján (2003), a su vez basadas en SECEG (1981). .....	33
Figura 2-6. Mapa geológico del Estrecho de Gibraltar en el que se muestra la situación de los rellenos de paleocanal en el entorno del Umbral del Estrecho (SECEG <i>et al.</i> , 1990). .....	34
Figura 2-7. Paleocanales en el área central del Umbral de Camarinal descubiertos e investigados por SECEG durante la ejecución de las campañas de sondeos marinos profundos y litologías atravesadas por dichas perforaciones (Sandoval <i>et al.</i> , 2011). .....	36
Figura 3-1. Situación de los principales reconocimientos .....	42
Figura 3-2. Situación de las obras singulares .....	43
Figura 3-3. Situación de las zanjas experimentales .....	44
Figura 3-4. Esquema y situación de los ensayos en la zanja Z-I (CEDEX, 1985a) .....	45
Figura 3-5. Esquema y situación de los ensayos en la zanja Z-III (CEDEX, 1985b) .....	46
Figura 3-6. Esquema y situación de los ensayos en la zanja Z-IV (CEDEX, 1985b). .....	47
Figura 3-7. Esquema y situación de los ensayos en la zanja Z-V (CEDEX, 1987a) .....	48
Figura 3-8. Esquema y situación de los ensayos en la zanja Z-VI (CEDEX, 1987a) .....	49
Figura 3-9. Sección, planta y esquema de sostenimientos del pozo experimental de Bolonia (SECEG, 1994e). .....	52
Figura 3-10. Esquema de la instrumentación colocada en el Pozo experimental de Bolonia. Tomada de SECEG (1994e). .....	53
Figura 3-11. Fotografía de 24 de enero de 2000 en la que se aprecia el socavón junto al brocal del pozo (Esteras, 2000). .....	55
Figura 3-12. Corte esquemático de la Galería de Tarifa (SECEG) .....	56
Figura 3-13. Esquema de la posición de los pernos de medida de convergencias (Martín Ruíz, 1998) ...	58

Figura 3-14. Esquema de la instrumentación de los anillos rígidos (Martín Ruíz, 1998). .....	59
Figura 3-15. Esquema geológico del pozo y galerías de Malabata (SECEG) .....	61
Figura 3-16. Esquema del complejo de pozos y galerías de Malabata (SNED, 1996) .....	62
Figura 3-17. Situación de los sondeos de la campaña 1982-1983 .....	64
Figura 3-18. Aspecto de los testigos del S-1. Caja 44 de 260,2 a 264,60 m (SECEG, 1983b).....	65
Figura 3-19. Aspecto de los testigos de la Unidad de Almarchal en el S-2. Caja 9. (SECEG, 1983b).....	66
Figura 3-20. Aspecto de los testigos de la Unidad de Bolonia en el S-2. Caja 33. (SECEG, 1983b).....	66
Figura 3-21. Aspecto de la Unidad de Bolonia en el S-3. Caja 8 entre 52 y 60 m. (SECEG, 1983b).....	67
Figura 3-22. Emanación de gas en el sondeo S-3 (SECEG, 1983b). .....	68
Figura 3-23. Aspecto de la Unidad de Almarchal en el S-4. Caja 4 aprox. 20 m. (SECEG, 1983b).....	68
Figura 3-24. Aspecto de la Unidad de Algeciras en el S-5. Caja 13 aprox. 75 m. (SECEG, 1983b). .....	69
Figura 3-25. Aspecto de la Unidad de Almarchal en el S-7. Caja 14 aprox. 90 m (SECEG, 1983b). .....	70
Figura 3-26. Aspecto de la Unidad de Almarchal en el S-9. Caja 9 aprox. 40 m (SECEG, 1983b). .....	70
Figura 3-27. Situación de los sondeos de la primera campaña en Marruecos (1983) .....	71
Figura 3-28. Situación de los sondeos de la campaña Sea Nautilus (1991) .....	72
Figura 3-29. Columnas simplificadas de los sondeos de las campañas Sea Nautilus-91 y Pholas-92 (SECEG, 1994c). .....	73
Figura 3-30. Situación de los sondeos de la campaña Pholas (1992) .....	74
Figura 3-31. Situación de los sondeos de la Kommandor Therese (1994) .....	75
Figura 3-32. Situación de los sondeos de la campaña Bavenit (1995) .....	77
Figura 3-33. Situación de los sondeos de la campaña Bucentaur (1997).....	79
Figura 3-34. Situación de los sondeos de la Campaña Norskald (1998-99) .....	81
Figura 3-35. Situación de los sondeos de la campaña Kingfisher (2005) .....	84
Figura 3-36. Localización de los ensayos de gato plano en el nivel -147 m de Malabata. ....	93
Figura 3-37. Resistencia al corte de los materiales de la Z-V. Se muestra la línea de resistencia intrínseca (CEDEX, 1987a). .....	97
Figura 3-38. Resistencia al corte de los materiales de la Z-VI. Se muestra la línea de resistencia intrínseca (CEDEX, 1987a). .....	98
Figura 3-39. Esquema de la realización de los ensayos de carga con placa horizontales en la zanja Z-I (CEDEX, 1985a). .....	102
Figura 3-40. Esquema de los ensayos de carga con placa realizados en los emplazamientos Z-III y Z-IV (CEDEX, 1985b). .....	103

Figura 3-41. Esquema de los ensayos de corte directo <i>in situ</i> realizados en Z-I (CEDEX, 1985a).....	106
Figura 3-42. Resistencia al corte de los materiales de la Z-I. Se muestra la línea de resistencia intrínseca (CEDEX, 1985a).....	106
Figura 3-43. Esquema de los ensayos de corte directo <i>in situ</i> realizados en las zanjas Z-III, Z-IV, Z-V y Z-VI (CEDEX, 1985b).....	107
Figura 3-44. Resistencia al corte de los materiales de la Z-III. Se muestra la línea de resistencia intrínseca (CEDEX, 1985b).....	107
Figura 3-45. Resistencia al corte de los materiales de la Z-IV. Se muestra la línea de resistencia intrínseca (CEDEX, 1985b).....	108
Figura 3-46. Diferentes orientaciones de las muestras en los ensayos de resistencia al corte directo. A: Paralela. B: Transversal. C: Perpendicular. (SECEG, 2001).....	126
Figura 4-1. Esquema de la localización de los sondeos realizados en la Zona 1.....	142
Figura 4-2. Esquema de la localización de los sondeos realizados en la Zona 2.....	142
Figura 4-3. Esquema de la localización de los sondeos realizados en la Zona 3.....	142
Figura 4-4. Ejemplo de curva presiométrica obtenida en el Flysch margo areniscoso micáceo .....	145
Figura 4-5- Ejemplo de curva presiométrica obtenida en las Pelitas rojas .....	145
Figura 4-6. Ejemplo de curva presiométrica obtenida en el Flysch calcáreo.....	145
Figura 4-7. Correlación propuesta entre el RMR y el módulo de deformación del macizo rocoso para los materiales estudiados de la Unidad de Algeciras en la galería de Tarifa (Muñiz <i>et al.</i> , 2012). .....	147
Figura 4-8: Esquemas de la dirección de tallado de las muestras en relación a la estratificación (CEDEX, 2012a). .....	148
Figura 4-9. Ejemplo de probetas obtenidas de una muestra. M-6943.....	149
Figura 4-10. Célula triaxial tipo Hoek del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.....	151
Figura 4-11: Resistencia triaxial del flysch margo-areniscoso-micáceo (muestras desecadas) según el criterio de rotura de Hoek y Brown (CEDEX, 2012a). .....	155
Figura 4-12: Curva de resistencia según el criterio de rotura de Hoek y Brown estimada para las muestras con humedad natural en el flysch margo-areniscoso-micáceo (CEDEX, 2012a). .....	155
Figura 4-13: Resistencia triaxial de las pelitas rojas (muestras húmedas) según el criterio de rotura de Hoek y Brown. ....	159
Figura 4-14. Muestra 6950-A antes de rotura.....	160
Figura 4-15. Ajuste lineal de los resultados de resistencia al corte directo en junta de las muestras de pelitas rojas (zona 2).....	161
Figura 4-16. Relación de la resistencia a compresión simple ( $\sigma_c$ ) de las muestras ensayadas con la humedad (w).....	166
Figura 4-17. Relación entre el módulo de deformación lineal ( $E_{lineal}$ ) de las muestras ensayadas con la humedad (w).....	166

Figura 5-1. Estimación del rango de confianza para la media en una distribución normal .....	175
Figura 5-2. Metodología empleada para la determinación de los parámetros característicos .....	177
Figura 5-3. Peso específico de los materiales de la Unidad de Algeciras. ....	185
Figura 5-4. Densidad <i>in situ</i> de los materiales arcillosos de la Unidad de Algeciras. ....	186
Figura 5-5. Índice de plasticidad de los materiales de la Unidad de Algeciras. ....	187
Figura 5-6. Gráfico de plasticidad de los materiales arcillosos de la Unidad de Algeciras .....	187
Figura 5-7. Resistencia a compresión simple de los materiales de la Unidad de Algeciras.....	188
Figura 5-8. Influencia de la humedad de las muestras en la RCS en los materiales de la Unidad de Algeciras.....	189
Figura 5-9. Módulo de Young de los materiales de la Unidad de Algeciras. ....	190
Figura 5-10. Módulo relativo de los diferentes materiales de la Unidad de Algeciras .....	190
Figura 5-11. Influencia de la humedad de las muestras en el Ei en los materiales de la U. de Algeciras	191
Figura 5-12. Coeficiente de Poisson de los materiales de la Unidad de Algeciras .....	192
Figura 5-13. Resistencia a la carga puntual de los materiales de la Unidad de Algeciras. ....	193
Figura 5-14. Resistencia a tracción indirecta de los materiales de la Unidad de Algeciras .....	193
Figura 5-15. Relación entre la RTI y la RCS en materiales arcillosos de la unidad de Algeciras.....	194
Figura 5-16. Influencia de la humedad de las muestras en la RTI en los materiales de la Unidad de Algeciras.....	194
Figura 5-17. Cohesión y ángulo de rozamiento interno de las litologías arcillosas de la Unidad de Algeciras.....	195
Figura 5-18. Envolventes de rotura de los materiales arcillosos de la Unidad de Algeciras .....	196
Figura 5-19. Velocidad de propagación de las ondas “p” de los materiales de la Unidad de Algeciras. ...	197
Figura 5-20. Velocidad de propagación de las ondas “s” de los materiales de la Unidad de Algeciras....	197
Figura 5-21. Módulo elástico dinámico de la matriz rocosa de los materiales de la Unidad de Algeciras. ....	198
Figura 5-22. Relación entre el módulo de deformación dinámico y el estático.....	199
Figura 5-23. Relación entre el módulo de deformación dinámico y la resistencia a compresión simple. .	199
Figura 5-24. Módulo presiométrico de los materiales de la Unidad de Algeciras. ....	200
Figura 5-25. Módulo de deformación con grippers de los materiales de la Unidad de Algeciras .....	201
Figura 5-26. Hinchamiento de las litologías arcillosas de la Unidad de Algeciras .....	202
Figura 5-27. Durabilidad de los materiales de la Unidad de Algeciras.....	202
Figura 5-28. Permeabilidad de la Unidad de Algeciras. ....	203

Figura 5-29. Peso específico de los materiales de la Unidad de Bolonia.....	204
Figura 5-30. Densidad seca <i>in situ</i> de la Unidad de Bolonia. ....	205
Figura 5-31. Índice de plasticidad de la Unidad de Bolonia. ....	206
Figura 5-32. Gráfico de plasticidad de la Unidad de Bolonia .....	206
Figura 5-33. Distribución estadística de la resistencia a compresión simple en la Unidad de Bolonia.....	207
Figura 5-34. Distribución estadística de la resistencia a la carga puntual de Unidad de Bolonia. ....	207
Figura 5-35. Módulo de deformación de la Unidad de Bolonia medido con placa de carga.....	209
Figura 5-36. Distribución estadística del hinchamiento Lambe en los materiales de la Unidad de Bolonia. .....	210
Figura 5-37. Distribución del índice de plasticidad de la Unidad de Facinas.....	212
Figura 5-38. Gráfico de plasticidad de la Unidad de Facinas.....	212
Figura 5-39. Módulo presiométrico de la Unidad de Facinas.....	213
Figura 5-40. Relación entre el módulo presiométrico ( $E_p$ ) y la profundidad. ....	214
Figura 5-41. Relación entre IP y los coeficientes de entumecimiento y consolidación para la U. Facinas .....	215
Figura 5-42. Distribución estadística de los parámetros de estado de la Unidad de Almarchal.....	216
Figura 5-43. Densidad <i>in situ</i> de los materiales de la Unidad de Almarchal.....	217
Figura 5-44. Distribución estadística del contenido en finos de la Unidad de Almarchal .....	218
Figura 5-45. Distribución estadística del índice de plasticidad de la Unidad de Almarchal. ....	218
Figura 5-46. Gráfico de plasticidad de la Unidad de Almarchal. ....	219
Figura 5-47. Distribución estadística de resistencia y deformabilidad de la roca matriz en U. de Almarchal .....	220
Figura 5-48. Relación entre los módulos de Young de la roca matriz y su resistencia a compresión simple para la unidad de Almarchal.....	221
Figura 5-49. Envolvente de rotura de Hoek y Brown para las muestras de Almarchal arcilloso. ....	222
Figura 5-50. Envolvente de rotura de Mohr-Coulomb para las muestras de Almarchal arcilloso. ....	222
Figura 5-51. Distribución de la resistencia al corte sin drenaje de la roca matriz en la Unidad de Almarchal .....	223
Figura 5-52. Distribución estadística de los parámetros resistentes del Almarchal arcilloso. ....	224
Figura 5-53. Envolventes de rotura de Mohr-Coulomb para los ensayos de corte directo, en función de la dirección de tallado para muestras de la Unidad de Almarchal. ....	224
Figura 5-54. Distribución estadística del módulo presiométrico de la Unidad de Almarchal. ....	226
Figura 5-55. Distribución estadística de los parámetros de hinchamiento de la Unidad de Almarchal....	227



Figura 5-56. Permeabilidad de la Unidad de Almarchal .....	228
Figura 5-57. Distribuciones de las propiedades elementales de las Brechas. ....	230
Figura 5-58. Distribución de los índices de plasticidad medidos en las Brechas.....	230
Figura 5-59. Gráfico de plasticidad de las brechas. ....	231
Figura 5-60. Resistencia y deformabilidad de las Brechas.....	232
Figura 5-61. Evolución de los parámetros resistentes con la profundidad en la Brechas.....	232
Figura 5-62. Permeabilidad de las brechas .....	233
Figura 5-63. Peso específico las arenas bioclásticas.....	234
Figura 5-64. Grado de certidumbre de los parámetros de los materiales arcillosos de la Unidad de Algeciras.....	236
Figura 5-65. Grado de certidumbre de los parámetros de los materiales detríticos de la Unidad de Algeciras.....	236
Figura 5-66. Grado de certidumbre de los parámetros de los materiales calcáreos de la Unidad de Algeciras.....	237
Figura 5-67. Grado de certidumbre de los parámetros de los materiales arcillosos de la Unidad de Bolonia. ....	238
Figura 5-68. Grado de certidumbre de los parámetros de los materiales detríticos de la Unidad de Bolonia. ....	238
Figura 5-69. Grado de certidumbre de los parámetros de los materiales calcáreos de la Unidad de Bolonia. ....	238
Figura 5-70. Grado de certidumbre de los parámetros de la Unidad de Facinas. ....	239
Figura 5-71. Grado de certidumbre de los parámetros de la Unidad de Almarchal. ....	240
Figura 5-72. Grado de certidumbre de los parámetros de las brechas. ....	241
Figura 5-73. Grado de certidumbre de los parámetros de las arenas bioclásticas .....	241
Figura 5-74. Grado de certidumbre de cada uno de los parámetros evaluados en las diferentes unidades. ....	242
Figura 5-75. Resistencia a compresión simple de los diferentes materiales analizados .....	244
Figura 5-76. Módulo de deformación de los diferentes materiales analizados .....	244
Figura 6-1. Curva presiométrica típica.....	250
Figura 6-2. Detalle de los medidores de deformación radial en un equipo presio-dilatómetro Igeotest PRD. ....	253
Figura 6-3. Curva tensión tangencial-desplazamiento en un ensayo de resistencia al corte directo en junta. ....	253
Figura 6-4. Esquema de modelo con anisotropía transversal.....	255

Figura 6-5. Esquema de modelo de anisotropía ortotrópica .....	256
Figura 6-6. Esquema de modelo con anisotropía transversal por fisuración .....	257
Figura 6-7. Esquema de modelo ortotrópico por fisuración .....	260
Figura 6-8. Sistema de referencia utilizado en el estudio de Kawamoto (1966). .....	261
Figura 6-9. Esquema de referencia del estudio de Kiehl y Wittke (1983) para la obtención de los módulos de deformación en un macizo rocoso con anisotropía transversal. ....	262
Figura 6-10. Obtención de los parámetros $V_0$ y $U_0$ (Kiehl y Wittke, 1983). ....	263
Figura 6-11. Ábacos para el análisis de ensayos dilatómétricos con $\Phi = 90^\circ$ (Kiehl y Wittke, 1983). ....	264
Figura 6-12. Ábacos para el análisis de ensayos dilatómétricos con $\Phi = 45, 60$ y $75^\circ$ .....	265
Figura 6-13. Esquema del ensayo de carga en cavidad cilíndrica (Amadei y Savage, 1991). ....	265
Figura 6-14. Tipos de anisotropías estudiadas (Amadei y Savage, 1991). ....	267
Figura 6-15. Esquema de orientación de los ejes, vectores principales y notación utilizada (Kolymbas <i>et al.</i> , 2012). ....	268
Figura 6-16. Comparación entre los datos medidos con gato radial y los calculados (Kolymbas <i>et al.</i> , 2012). ....	269
Figura 6-17. Representación del sistema de coordenadas utilizado (Hefny y Lo, 1999). ....	269
Figura 6-18. Simulación de un macizo anisótropo mediante roca matriz y una familia dominante de discontinuidades (Fortsakis <i>et al.</i> , 2012). ....	271
Figura 6-19. Definición del ángulo $\alpha$ (Fortsakis <i>et al.</i> , 2012). ....	272
Figura 6-20. Relación entre las convergencias calculadas con el modelo anisótropo discontinuo ( $u$ ) y las calculadas con el modelo isótropo ( $u_{is}$ ) (Fortsakis <i>et al.</i> , 2012). ....	272
Figura 6-21. Relación entre las convergencias calculadas con el modelo anisótropo discontinuo ( $u$ ) y las calculadas con el modelo anisótropo continuo ( $u_{tr}$ ) (Fortsakis <i>et al.</i> , 2012). ....	273
Figura 6-22. Esquema de la orientación y espaciado de las juntas (Wang y Huang, 2013). ....	274
Figura 6-23. Variación del desplazamiento radial para diferentes números de familias. Para el caso de una sola familia, esta tiene un ángulo de buzamiento de $30^\circ$ (Wang y Huang, 2013). ....	274
Figura 6-24. Esquema de los diferentes métodos de modelización. Modificado de Fortsakis <i>et al.</i> (2012) .....	277
Figura 6-25. Modelo Continuo. $E_1/E_2 = 2$ . ....	279
Figura 6-26. Resultados del Modelo Continuo. $E_1/E_2 = 2$ .....	279
Figura 6-27. Modelo Discontinuo. $E_1/E_2 = 2$ y $\lambda = 7,5$ cm. ....	279
Figura 6-28. Resultados del Modelo Discontinuo. $E_1/E_2 = 2$ y $\lambda = 7,5$ cm. ....	279
Figura 6-29. Modelo Discontinuo. $\lambda = 0,6R$ . Vista completa. ....	280
Figura 6-30. Resultado del Modelo Discontinuo. $\lambda = 0,6R$ . Deformación del plano horizontal $z = 0,5$ m. ....	280

Figura 6-31. Esquema del desplazamiento del origen de la familia de juntas.....	282
Figura 6-32. Desplazamientos radiales medidos con Phase <sup>2</sup> para un espaciado de $\lambda=0,1R$ . ....	282
Figura 6-33. Desplazamientos radiales medidos con Phase <sup>2</sup> para un espaciado de $\lambda=0,2R$ . ....	282
Figura 6-34. Desplazamientos radiales medidos con Phase <sup>2</sup> para un espaciado de $\lambda=0,4R$ . ....	283
Figura 6-35. Desplazamientos radiales medidos con Phase <sup>2</sup> para un espaciado de $\lambda=0,6R$ . ....	283
Figura 6-36. Desplazamientos radiales medidos con Phase <sup>2</sup> para un espaciado de $\lambda=1,5R$ . ....	283
Figura 6-37. Desplazamientos radiales medidos con Phase <sup>2</sup> para un espaciado de $\lambda=2R$ . ....	283
Figura 6-38. Desplazamientos radiales medidos con Phase <sup>2</sup> para un espaciado de $\lambda=4R$ . ....	284
Figura 6-39. Desplazamientos radiales medidos con Phase <sup>2</sup> para un espaciado de $\lambda=10R$ . ....	284
Figura 6-40. Influencia de la posición de las discontinuidades respecto al sondeo en función del espaciado de las mismas para las diferentes direcciones de medida.....	284
Figura 6-41. Influencia de la posición de las discontinuidades respecto al sondeo en función del espaciado de las mismas. ....	285
Figura 6-42. Desplazamientos radiales para los casos con $E_1/E_2 = 3$ .....	286
Figura 6-43. Desplazamientos radiales para los casos con $E_1/E_2 = 2$ .....	286
Figura 6-44. Desplazamientos radiales para los casos con $E_1/E_2 = 1,33$ .....	286
Figura 6-45. Errores promedio y máximo cometidos con el modelo continuo anisótropo respecto al modelo discontinuo equivalente.....	287
Figura 6-46. Ejemplo del modelo utilizado con un buzamiento de las juntas de 45°. ....	290
Figura 6-47. Corte transversal del modelo presentado en la Figura 6-46. ....	290
Figura 6-48. Modelo 3DEC deformado con $\beta=30^\circ$ . Corte horizontal por el centro de la zona ensayada. ..	293
Figura 6-49. Modelo 3DEC deformado con $\beta=80^\circ$ . Corte horizontal por el centro de la zona ensayada. ..	293
Figura 6-50. Influencia del buzamiento en la deformación para una carga radial de 10 MPa. ....	294
Figura 6-51. Influencia del $E_i$ en la deformación para una carga radial de 10 MPa.....	294
Figura 6-52. Influencia del $k_s$ en la deformación para una carga radial de 10 MPa.....	294
Figura 6-53. Influencia del $k_n$ en la deformación para una carga radial de 10 MPa.....	294
Figura 6-54. Influencia del $\nu$ en la deformación para una carga radial de 10 MPa.....	294
Figura 6-55. Diferencias de comportamiento de una cavidad cilíndrica en medio fisurado en función de la relación $\beta$ - $\chi$ .....	295
Figura 6-56. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para $\beta=10^\circ$ .....	297
Figura 6-57. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para $\beta=20^\circ$ .....	297

Figura 6-58. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para $\beta=30^\circ$ .....	297
Figura 6-59. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para $\beta=40^\circ$ .....	297
Figura 6-60. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para $\beta=45^\circ$ .....	297
Figura 6-61. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para $\beta=50^\circ$ .....	297
Figura 6-62. Comportamiento de una cavidad cilíndrica en medio fisurado sometida a una carga radial para buzamientos mayores a $\chi$ . Vista paralela al eje de la cavidad.....	298
Figura 6-63. Curva “desplazamiento radial-ángulo $\theta$ ” de un modelo Phase <sup>2</sup> con $\beta=90^\circ$ en el que se aprecia una discontinuidad en la curva a $45^\circ$ coincidiendo con el ángulo $\chi$ ( $E_I=5.000$ MPa; $\nu=0,3$ ; $k_n=100.000$ MPa/m; $k_s=5.000$ MPa/m; $\Delta P=10$ MPa). .....	298
Figura 6-64. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para $\beta=60^\circ$ .....	300
Figura 6-65. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para $\beta=70^\circ$ .....	300
Figura 6-66. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para $\beta=80^\circ$ .....	300
Figura 6-67. Comparación entre el modelo y la aproximación empírica para $\beta=90^\circ$ .....	300
Figura 6-68. Curva “desplazamiento radial medido ( $\Delta R_\theta$ ) – $\text{seno}^2\theta$ ” obtenida a partir del modelo 3DEC para $\beta=40^\circ$ , según los parámetros del apartado 6.3.1.....	301
Figura 6-69. Curva “desplazamiento radial – $\text{seno}^2\theta$ ” obtenida a partir del modelo 3DEC para $\beta=70^\circ$ , según los parámetros del apartado 6.3.1.....	302
Figura 6-70. Distribución estadística de los errores de estimación de $E_{0^\circ}$ con los modelos que presentan $E_{0^\circ}/E_{90^\circ} \leq 5$ . .....	304
Figura 6-71. Distribución estadística de los errores de estimación de $E_{90^\circ}$ con los modelos que presentan $E_{0^\circ}/E_{90^\circ} \leq 5$ . .....	305
Figura 6-72. Comparación entre diferentes modelos y las deformaciones calculadas para $\beta=90^\circ$ con los parámetros utilizados anteriormente.....	306
Figura 6-73. Influencia del ángulo $\beta$ en el error cometido al calcular $E_{0^\circ}$ una vez corregido este.....	307



## **APÉNDICE I**

### **CORRELACIONES PARA LA ESTIMACIÓN DEL MÓDULO DE DEFORMACIÓN EN MACIZOS ROCOSOS**



## APÉNDICE I: CORRELACIONES PARA LA ESTIMACIÓN DEL MÓDULO DE DEFORMACIÓN EN MACIZOS ROCOSOS

El módulo de deformación de un macizo rocoso es uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta a la hora de realizar cualquier diseño geotécnico. La determinación de este módulo constituye un problema teórico y práctico no resuelto aun totalmente (Serrano, 1998; Romana, 2002).

A la hora de evaluar la deformabilidad de un macizo rocoso las discontinuidades juegan un papel importante. Esto hace que el factor escala cobre gran importancia. El volumen elemental representativo es, en la gran mayoría de las ocasiones, demasiado grande para poder realizar ensayos de laboratorio que definan correctamente las propiedades del macizo y, por tanto, el único método que proporciona una estimación razonable es el uso de ensayos in-situ a gran escala (Deere y Miller, 1966).

Este tipo de ensayos (dilatómetros, triaxiales in situ, placa de carga, gato plano, cámara de presión, gato radial...) son caros y su realización se reduce, normalmente, a unos pocos ensayos en grandes obras. La heterogeneidad del macizo hace que el número de ensayos ha realizar ha de ser lo suficientemente grande para permitir una evaluación fiable de la media estadística de las propiedades de geotécnicas del material (Terzaghi, 1963).

Todo esto hace que desde los años 60 del siglo XX se busque la manera de obtener el módulo de deformación del macizo, de manera indirecta, mediante correlaciones con diferentes parámetros del mismo.

A continuación se recogen varias de estas correlaciones. Todas ellas expresan el módulo de deformación en GPa.

### CORRELACIONES BASADAS EN EL RQD

#### Deere et al. (1967)

Uno de los primeros trabajos en los que se busca un método indirecto para la obtención del módulo de deformación del macizo fue publicado por Deere *et al.* en 1967. En este artículo los autores proponen la utilización de correlaciones con el RQD y con el cuadrado de la relación entre la velocidad de onda medidas en campo y en laboratorio o índice de velocidad  $((V_F/V_L)^2)$  como método para la obtención de un factor de reducción que relacione el módulo de deformación de la roca matriz con el módulo del macizo.

Las correlaciones se presentan gráficamente sin proponer una fórmula concreta. Estos gráficos fueron realizados a partir de datos in-situ en varia localizaciones y con diferentes tipos de roca.



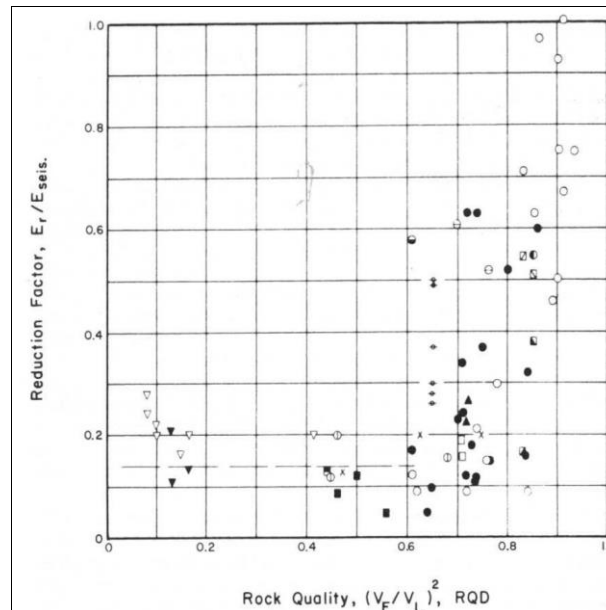


Figura I- 1. Variación del factor de reducción con la calidad de la roca Deere *et al.* (1967)

### **Coon y Merritt (1970)**

Coon y Merritt, utilizando los datos de la presa de Dworshk (también utilizados por Deere *et al.*, 1967) y de otras 3 presas en los Estados Unidos, analizan la relación del módulo de deformación del macizo con los índices de calidad RQD y el índice de velocidad, de la misma manera que lo habían hecho Deere *et al.*

De su trabajo encuentran una relación entre el módulo del macizo y el RQD para las rocas estudiadas, señalando que esta relación solamente puede ser usada para rocas con módulos de deformación altos ya que las rocas estudiadas (Gneises, areniscas y calizas) presentaban módulos entre  $3 \cdot 10^6$  -  $10 \cdot 10^6$  psi (20 – 68 GPa).

Para evitar este inconveniente utilizan el RQD para obtener un factor de corrección (del mismo modo que Deere *et al.*, 1967) entre el módulo del macizo y el módulo de la roca intacta medido en laboratorio, obteniendo la siguiente relación:

$$\frac{E_c}{E_I} = 0,0231 \cdot RQD - 1,32$$

Esta correlación solamente es válida para valores de RQD > 60 ya que los datos estudiados con RQD menores son muy escasos.

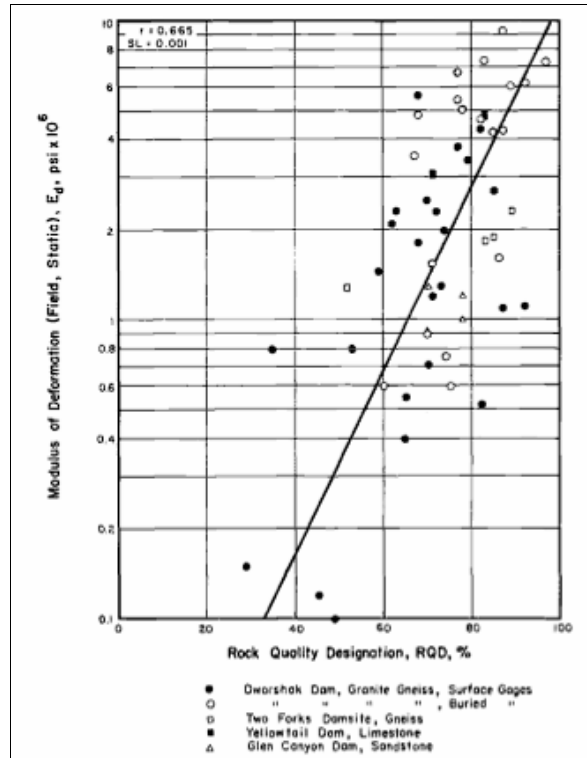


Figura I- 2. Correlación de Coon y Merrit (1970)

De la misma manera que hicieron con el RQD, los autores intentaron encontrar una correlación con el índice de velocidad aunque la dispersión de los datos fue mayor y el índice de correlación peor. Según los autores, debido al mayor volumen de macizo ensayado con este último método.

## Trunk y Floss (1991)

En 1991 Trunk y Floss presentan en el 7º Congreso internacional de la ISRM una correlación realizada a partir de estudios probabilísticos. Esta relaciona el módulo de deformación del macizo con el módulo de deformación de la roca matriz y su resistencia a compresión simple (RCS) en función del RQD.

$$E_C = 0,069 RQD + 0,052 E_I + 0,055 RCS - 3,82$$

Con esta correlación pretendían obtener parámetros geomecánicos a utilizar en las primeras fases de proyecto de cavernas para centrales hidroeléctricas.

Honisch (1995) recoge esta fórmula de manera simplificada.

$$E_C = 0,07 RQD + 0,05 E_I + 0,055 RCS$$

### **Kayabasi et al. (2003)**

Kayabasi *et al* (2003) publican una correlación entre el módulo de deformación del macizo y las propiedades de la roca matriz.

El estudio analiza los resultados de 57 ensayos de placa de carga realizados sobre cuarzodioritas y calizas con grados de meteorización entre GM I y GM IV, localizadas en el emplazamiento de dos presas en Turquía (Artvin y Karaman).

En base a los datos analizados en el artículo, los autores exponen que los parámetros más influyentes en el modulo de deformación del macizo son en RQD, el módulo de deformación del macizo y en grado de meteorización de las discontinuidades. Y proponen la siguiente fórmula:

$$E_c = 0,135 \left[ \frac{E_t \cdot \left( 1 + \frac{RQD}{100} \right)}{GM} \right]^{1,1811}$$

### **Gokceoglu et al. (2003)**

Gokceoglu *et al.* (2003) amplían el número de datos utilizados en el estudio anterior incorporando los ensayos de una tercera presa (Ermenek, Turquía). Con los 115 datos analizados modifican la formula anterior incorporando la resistencia a compresión simple de la roca matriz:

$$E_c = 0,001 \left[ \frac{\frac{E_t}{RCS} \cdot \left( 1 + \frac{RQD}{100} \right)}{GM} \right]^{1,5528}$$

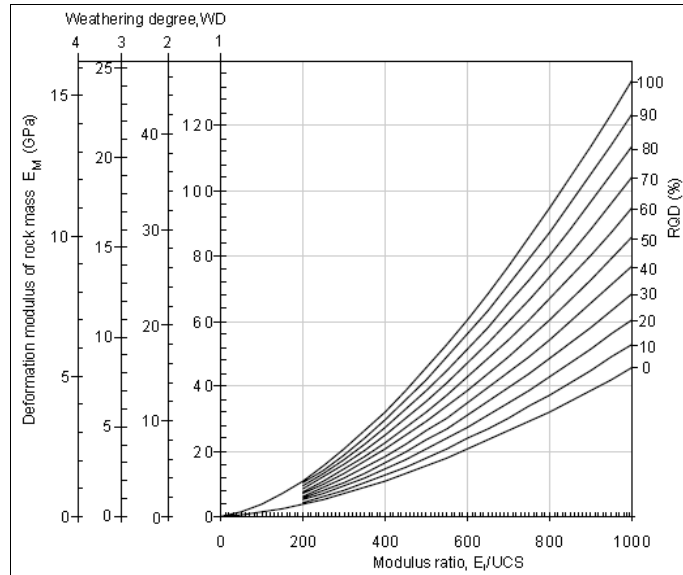


Figura I- 3. Predicción del módulo de deformación según Gokceoglu et al. (2003).

Además de otras dos en función del GSI y del RMR respectivamente:

$$E_c = 0,0736 \cdot e^{0,0755 \cdot RMR}$$

$$E_c = 0,1451 \cdot e^{0,0654 \cdot GSI}$$

### **Zhang y Einstein (2004)**

En 2004, Zhang y Einstein, se basan en el estudio de Coon y Merritt (1970), añadiéndole datos de ensayos publicados por Bieniawski (1978) y Ebisu *et al.* (1992), para buscar una correlación entre el módulo de deformación del macizo y el RQD que cubriera todo el rango posible ( $0 < RQD < 100$ ), obteniendo la siguiente fórmula:

$$E_c = E_I \cdot 10^{0,0186 RQD - 1,91}$$

Los datos analizados cubren todo el rango del RQD además de pertenecer a diferentes tipos de roca (lutitas, areniscas, limolitas, gabros, calizas, granitos, etc.).

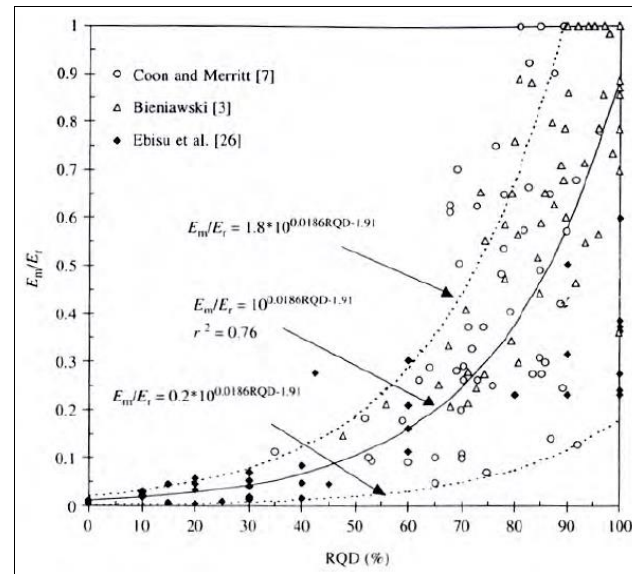
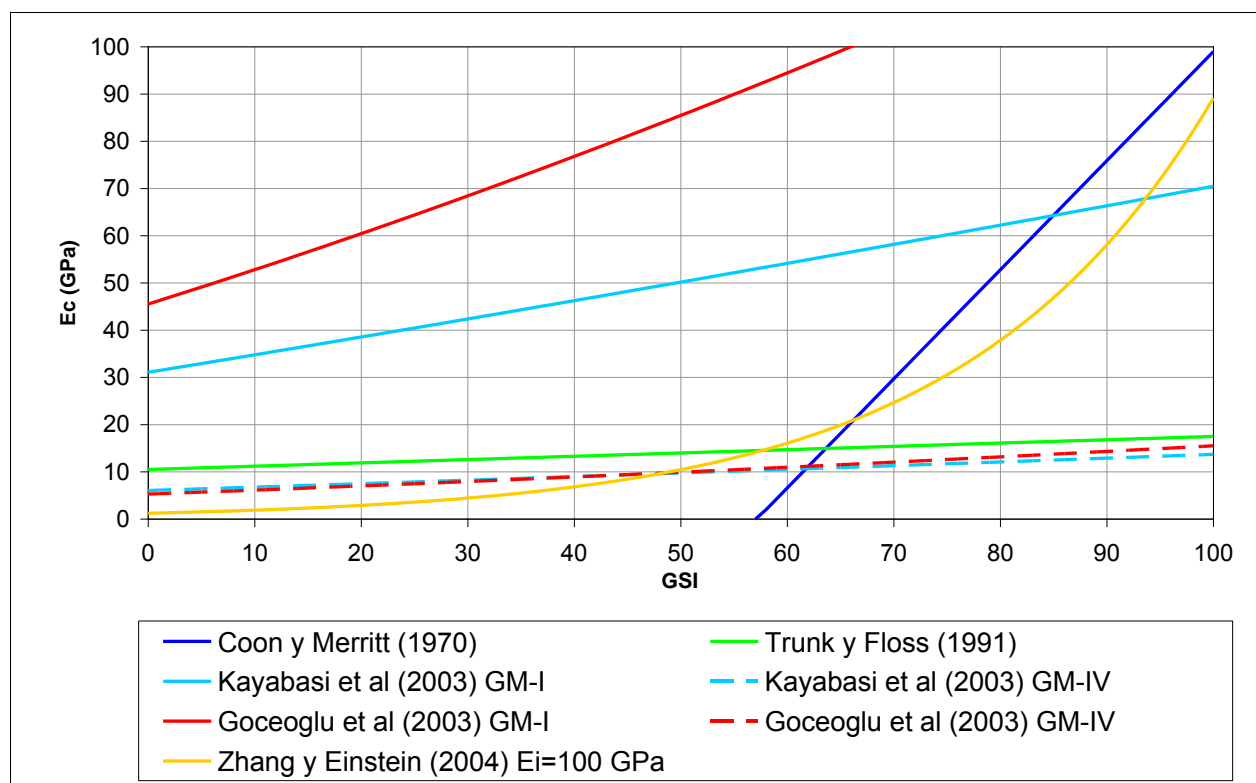


Figura I- 4. Correlación de Zhang y Einstein (2004)

Según los autores la dispersión de los datos se puede deber a varios factores como: los diferentes tipos de ensayos de campo realizados, los diferentes estados de las discontinuidades, la anisotropía de los macizos y la falta de sensibilidad del RQD para frecuencias de fracturación mayores a 10 cm.

## Comparación

Figura I- 5. Comparación entre las diferentes correlaciones entre el  $E_c$  y el RQD

Se observa como la correlación de Trunk y Floss (1991) presenta valores muy bajos para RQD altos, parecidos a los de Kayabasi *et al.* (2003) y Gokceoglu *et al.* (2003) con GM IV. Estas dos últimas correlaciones presentan valores muy parecidos ese grado de alteración.

## CORRELACIONES BASADAS EN EL RMR

### Bieniawski (1978)

En 1978 Bieniawski analiza los datos de más de 100 ensayos in-situ, en los que se incluyen gatos planos, gatos Goodman, placas de carga, microsísmica y medida de deformaciones en túnel, obtenidos en tres grandes proyectos hidráulicos sudafricanos.

Los ensayos fueron realizados sobre macizos de diferentes tipos rocosos (doleritas, calizas, esquistos, lutitas, limolitas y areniscas) sanos y con RMR mayor de 40 en todos los casos.

De este análisis obtiene una correlación entre el módulo de deformación in-situ y el índice de calidad del macizo RMR.

$$E_c = 2 \cdot RMR - 100$$

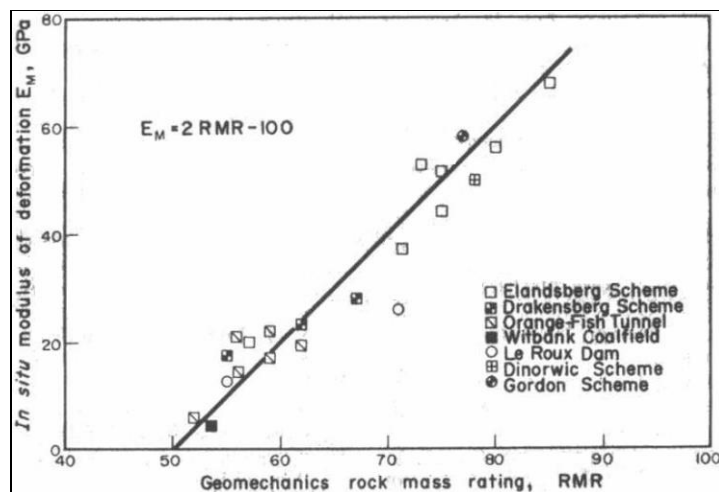


Figura I- 6. Correlación de Bieniawski (1978)

Según los cálculos de Bieniawski esta correlación tiene un error inferior al 20% en la predicción del módulo de deformación del macizo.

En el mismo artículo, haciendo referencia al trabajo de Deere *et al.* (1967) se rechaza el RQD como parámetro adecuado para la correlación entre el módulo de campo y el módulo de la roca matriz debido a la gran dispersión de datos y a la imposibilidad de correlacionar los valores con  $RQD < 70\%$ .

## **Serafim y Pereira (1983)**

La imposibilidad de utilizar esta fórmula para macizos con  $RMR < 50$  lleva a Serafim y Pereira (1983) a desarrollar una nueva correlación que pueda ser aplicada a macizos de peor calidad.

Para este estudio utilizaron 15 datos provenientes del estudio de 5 presas y 2 túneles y como conclusión propusieron la siguiente fórmula:

$$E_c = 10^{\frac{RMR-10}{40}}$$

La correlación es buena para  $RMR > 34$  y empeora para valores más bajos. Solamente 3 de los datos estudiados tienen  $RMR$  menor que 34, siendo 22 el índice más bajo utilizado.

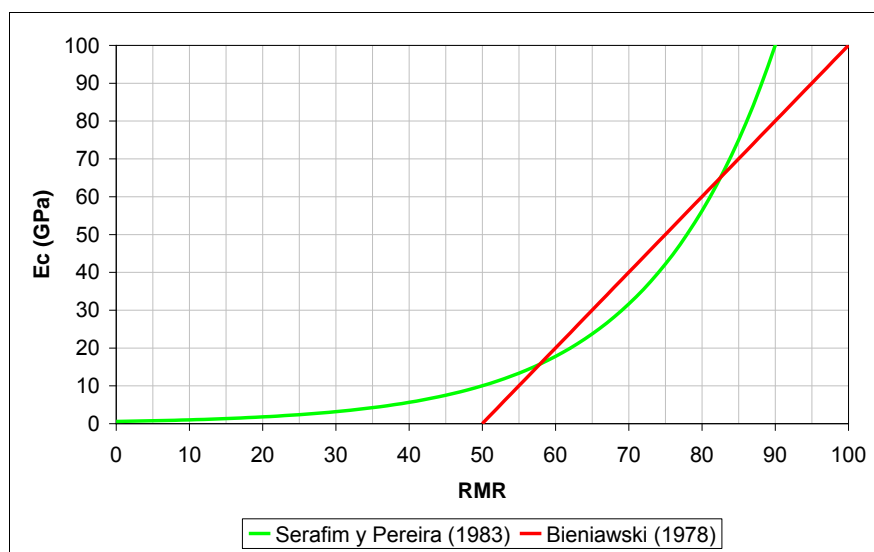


Figura I- 7. Comparación entre la correlación de Serafim y Pereira (1983) y Bieniawski (1978).

## **Nicholson y Bieniawski (1990)**

Nicholson y Bieniawski (1990) proponen la siguiente fórmula considerando el módulo de Young de la roca matriz además del  $RMR$  del macizo:

$$E_c = \frac{E_I}{100} \cdot \left( 0,0028(RMR)^2 + 0,9 e^{\frac{RMR}{22,82}} \right)$$

El coeficiente de correlación conseguido con esta función es de 0,472.

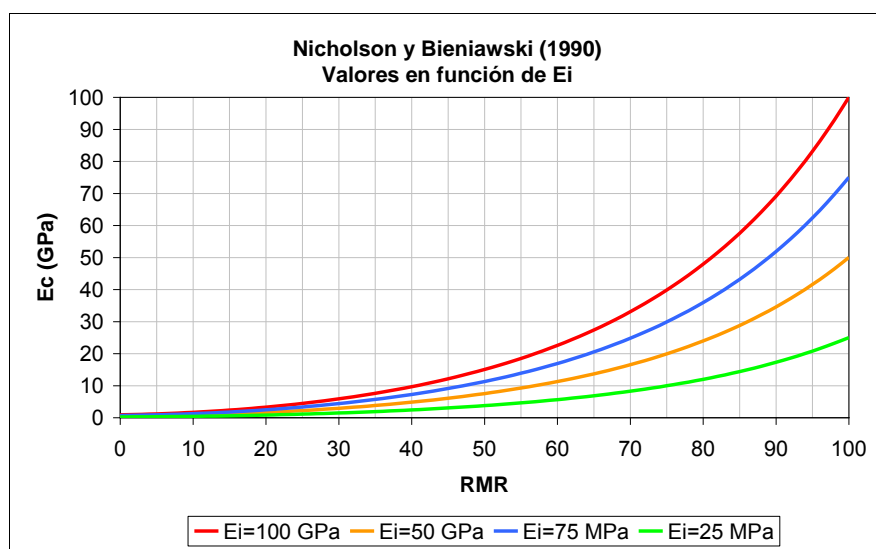


Figura I- 8. Correlación de Nicholson y Bieniawski (1990). Variación con el Ei

## **Mehrotra (1992)**

Mehrotra, en su tesis doctoral, corrige ligeramente la correlación de Serafim y Pereira (1983):

$$E_c = 10^{\frac{RMR-20}{38}}$$

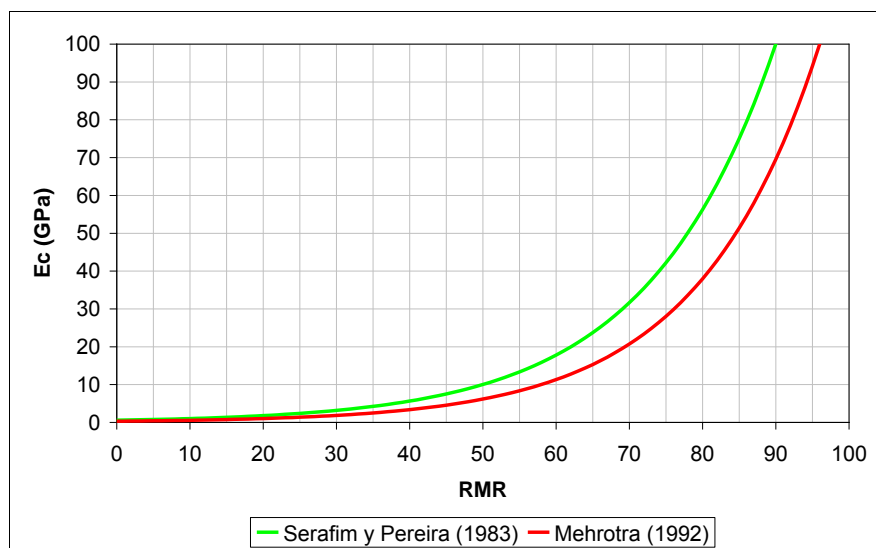


Figura I- 9. Comparación entre las correlaciones de Mehrotra (1992) y Serafim y Pereira (1983)



## **Boyd (1993)**

Boyd propone en 1993 un rango de correlación entre el RMR y el módulo de Young en función del nivel de esfuerzos que sufre el macizo basándose en los datos de ensayos in-situ publicados por Bieniawski (1978).

El rango va desde  $10^{-4} \cdot (\text{RMR})^3$  para altos niveles de esfuerzo a  $10^{-6} \cdot (\text{RMR})^4$  para niveles bajos. El valor medio de la correlación será el siguiente:

$$E_c = 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot (\text{RMR})^{3,75}$$

## **Mitri et al. (1994)**

Mitri *et al.* proponen la siguiente correlación, a partir de estudios numéricos modelizados con datos de excavaciones mineras subterráneas:

$$E_c = \frac{E_I}{2} \cdot \left( 1 - \cos \left( \frac{\pi \cdot \text{RMR}}{100} \right) \right)$$

Tomando un valor de  $E_I$  de 50 GPa

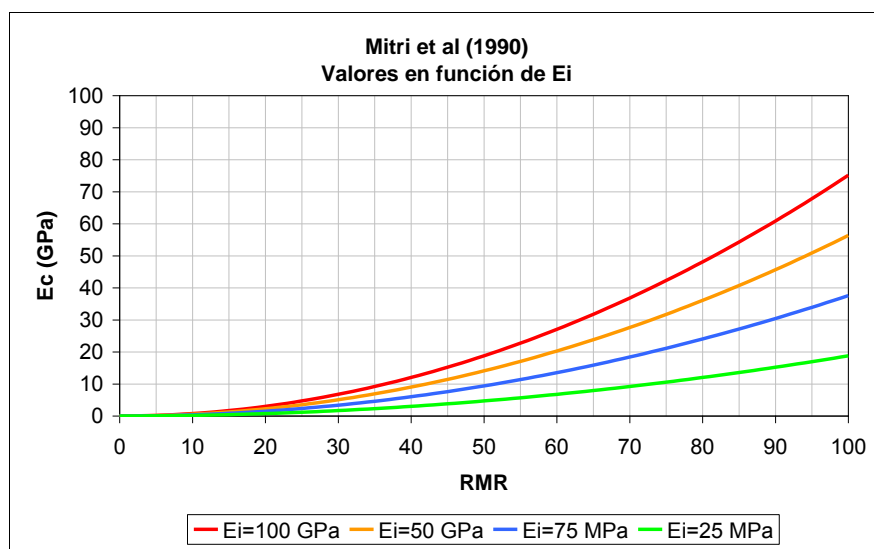


Figura I- 10. Correlación de Mitri *et al.* (1994). Variación con el Ei

### **(Jasarevic y Kovaceviv (1996))**

En base a una decena de ensayos *in situ* realizados en Croacia sobre macizos calizos los autores proponen la siguiente correlación:

$$E_c = e^{(4,407+0,081RMR)}$$

A partir de ésta, y mediante correlaciones entre diferentes parámetros, proponen las siguientes ecuaciones con Q y  $V_P$ :

$$E_c = e^{(0,7971+0,729\ln Q)}$$

$$E_c = e^{(4,950+0,900V_P)}$$

### **Verman et al. (1997)**

Verman *et al.* (1997) publican un trabajo basado el *back-analysis* de 5 túneles en Turquía con RMR entre 31 y 68.

Utilizando la correlación de Mehrotra (1992) proponen la utilización de un factor de corrección a la misma, en función de la profundidad del túnel, para profundidades superiores a 50 m. Esto tendría en cuenta la variación del módulo de deformación con el nivel de esfuerzos.

$$E_c = f \cdot 10^{\frac{RMR-20}{38}}$$

El factor de corrección será:

$$f = H^\alpha$$

siendo:

H la profundidad en metros

$\alpha$  una constante que varía entre 0,16 y 0,3.

La fórmula resultante sería:

$$E_c = 0,4 \cdot H^\alpha \cdot 10^{\frac{RMR-20}{38}}$$

### **Aydan et al. (1997)**

En base al análisis de los datos aportados por varios proyectos en Japón, junto a los datos de Bieniawski (1978) y Serafim y Pereira (1983) los autores proponen la siguiente ecuación empírica:

$$E_c = 0,0097 \cdot RMR^{3,54}$$

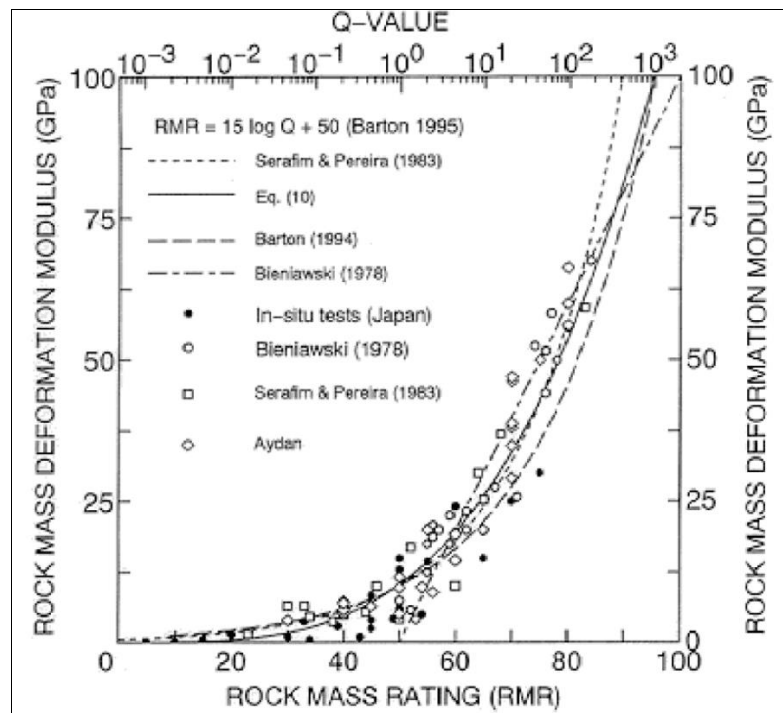


Figura I- 11. Comparación entre la correlación propuesta por Aydan *et al.* (1997) y las propuestas por otros autores.

### **Read et al. (1999)**

Tras el estudio de unos macizos grauvaquicos permotriásicos en Nueva Zelanda, propone la siguiente ecuación:

$$E_c = 0,1 \cdot \left( \frac{RMR}{10} \right)^{0,3}$$

Esta ecuación es comparada con la de Serafim y Pereira (1983) y destacando de esta comparación el valor más realista para  $RMR = 100$ , siendo en el caso de la correlación aquí presentada de 100 GPa mientras que en la de Serafim y Pereira (1983) sería de 178 GPa.

### **Aydan y Kawamoto (2000)**

En base a más de 130 datos proporcionados por Aydan *et al.* (1997), los autores proponen una ecuación general para la correlación de diferentes parámetros con el RMR. Esta ecuación variará tres coeficientes ( $\alpha_0$ ,  $\alpha_{100}$  y  $\beta$ ) en función del parámetro a medir:

$$\alpha = \alpha_0 - (\alpha_0 - \alpha_{100}) \frac{RMR}{RMR + \beta(100 - RMR)}$$

Donde  $\alpha_0$  es el valor de la función para  $RMR = 0$ ,  $\alpha_{100}$  es el valor para  $RMR=100$  y  $\beta$  es un parámetro de ajuste. En este caso los parámetros propuestos son  $\alpha_0=0$ ,  $\alpha_{100}=1$  y  $\beta=6$ , por lo que la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$E_c = E_0 - (E_{100} - E_0) \frac{RMR}{RMR + 6(100 - RMR)}$$

### **Gokceoglu et al. (2003)**

Como se vio anteriormente, Gokceoglu et al. (2003) proponen la siguiente correlación basada en el RMR:

$$E_c = 0,0736 \cdot e^{0,0755 \cdot RMR}$$

### **Galera et al. (2005)**

Galera *et al.* (2005) publican el análisis de numerosos ensayos presiométricos realizados por los autores así como datos publicados por Bieniawski (1978), Serafim y Pereira (1983) y Labrie *et al.* (2004). En este artículo proponen el ensayo presiométrico (o dilatómetro) como el mejor ensayo *in situ* para determinar las propiedades deformacionales de un macizo rocoso.

Como resultado del análisis proponen la siguiente correlación entre el módulo de deformación del macizo y el RMR considerando el módulo elástico de la roca matriz:

$$E_c = E_I \cdot e^{\frac{RMR-100}{36}}$$

Con esta fórmula los autores consiguieron un coeficiente de correlación de 0,656, mayor al conseguido por Nicholson y Bieniawski (1990).

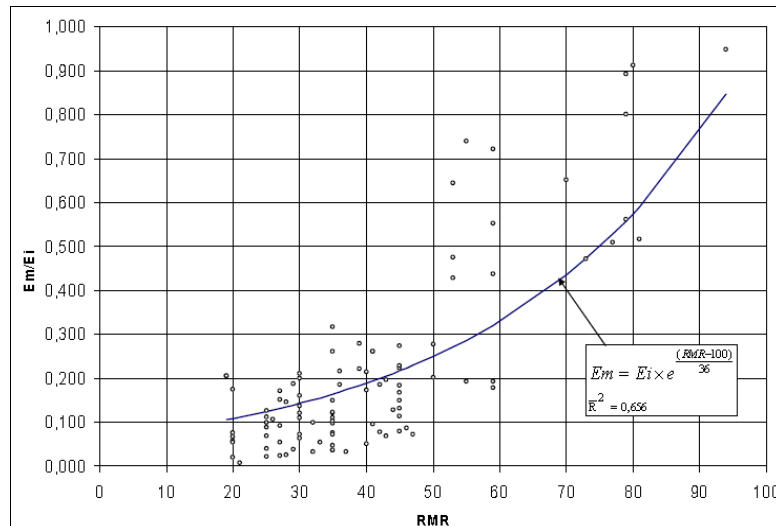


Figura I- 12. Correlación de Galera *et al.* (2005). Datos estudiados

En caso de no contarse con datos suficientes sobre la deformabilidad de la roca matriz, también proponen una correlación en función solamente del RMR. Esta correlación diferencia entre  $RMR \leq 50$  para el que proponen una fórmula lineal:

$$E_C = 0,0876 \cdot RMR$$

Con esta fórmula los autores consiguieron un coeficiente de correlación de 0,656, mayor al conseguido por Nicholson y Bieniawski (1990).

En caso de macizos con  $RMR > 50$  proponen una relación polinómica:

$$E_C = 0,0876 \cdot RMR + 1,056 \cdot (RMR - 50) + 0,015 \cdot (RMR - 50)^2$$

El coeficiente de correlación obtenido con esta correlación es de 0,8, mayor al conseguido por Serafim y Pereira (1983): 0,742.

### **Sonmez et al. (2006)**

Este trabajo presenta una correlación que, según los autores, puede ser usada para todo el rango de RMR, desde macizos de muy baja calidad a macizos masivos con RMR altos.

Los datos analizados han sido recogidos de la publicación de Nicholson y Bieniawski (1990), que a su vez recoge los de Bieniawski (1978) y Serafim y Pereira (1983).

La ecuación propuesta es la siguiente:

$$E_C = E_i 10^{\frac{(RMR-100)(100-RMR)}{4000 \cdot \exp(-RMR/100)}}$$

### **Isik et al. (2008)**

Isik et al. (2008) analizaron 27 ensayos presiométricos realizados en grauvacas fracturadas. Los datos estudiados presentaron una extremadamente alta correlación ( $r^2=0,94$ ), para  $RMR \geq 27$ , según la siguiente fórmula:

$$E_C = (6,7 \cdot RMR - 103,06) \cdot 10^{-3}$$

En el mismo trabajo encuentran también una altísima correlación ( $r^2=0,94$ ), utilizando el índice GSI:

$$E_C = (5,47 \cdot GSI) \cdot 10^{-3}$$

Esta correlación proporciona valores mucho más bajos que el resto de correlaciones como se puede ver en el apartado siguiente.

### **Chun et al. (2009)**

Chun et al. (2009) obtienen, en base a 61 datos recogidos en obras lineales en Corea, una ecuación empírica para el cálculo del  $E_C$  en base a los diferentes apartados del RMR. Es decir, descomponen el RMR en sus diferentes parámetros y con ello obtienen una regresión.

Los parámetros analizados son: la resistencia a compresión simple de la roca matriz ( $\sigma_C$ ), el RQD, el espaciado de las juntas ( $J_s$ ), el estado de las juntas ( $J_c$ ) y la profundidad ( $P$ ). El valor a introducir en la ecuación será la puntuación otorgada para cada uno de estos valores por el sistema RMR, por tanto,  $\sigma_C$  irá de 1 a 15,  $F_{RQD}$  de 0 a 20,  $J_s$  tomará un valor de 1 a 20,  $J_c$  irá de 1 a 30.

La ecuación polinómica resultante es la siguiente:

$$E_C = 10^{-5} \cdot (5.992 \cdot P^2 + 1.883 \cdot \sigma_C^4 + 4.851 \cdot F_{RQD}^3 + 0.031 \cdot J_s^5 + 2399.530 \cdot J_c)$$

### **(Mohammadi y Rahmannedjad (2010))**

Estos autores utilizan los datos publicados en Bieniawski (1978), Serafim y Pereira (1983), (Stephens y Banks (1989)) y (Gokceoglu et al. (2003)). La formula polinómica resultante es la siguiente:

$$E_C = 3 \cdot 10^{-4} RMR^3 - 0,0193 RMR^2 + 0,3157 RMR + 3,4064$$

La ecuación obtenida se compara con 17 ensayos de carga en placa realizados para el proyecto de la Presa Karun IV en Irán. El macizo sobre el que se realizaron los ensayos estaba compuesto por caliza y mármol con un elevado grado de fracturación.

### **Khabbazi et al. (2012)**

Estos autores utilizan una base de datos, obtenida en los proyectos de dos presas y un túnel en Irán, consistente en 82 ensayos dilatómétricos. Las litologías analizadas son variadas. La ecuación propuesta es:

$$E_C = 9 \cdot 10^{-7} \cdot RMR^{3,868}$$

### **Shen et al. (2012)**

En este trabajo se utilizan resultados de ensayos de campo proveniente de las publicaciones de Bieniawski (1978), Serafim y Pereira (1983) y (Stephens y Banks (1989)). Estos datos son ajustados mediante funciones gaussianas para proponer las siguientes ecuaciones.

$$E_C = 110 \cdot e^{\left(\frac{RMR-110}{37}\right)^2}$$

$$E_C = 1.14 E_I \cdot e^{\left(\frac{RMR-116}{41}\right)^2}$$

Según el estudio realizado, se da a las ecuaciones una fiabilidad de  $\pm 10$  GPa para la primera y  $\pm 0,1 E_C/E_I$  para la segunda.

### **Muñiz Menéndez et al. (2013)**

Véase apartado 4.2

## Comparación

A la vista de la Figura I-13 se observa como todas las correlaciones dan valores muy parejos para RMR altos, apareciendo las mayores diferencias para RMR medios. Se aprecia un gran aumento de los valores de  $E_c$  a partir de RMR 50.

La correlación de Isik *et al.* (2008), desarrollada para macizos débiles, da valores mucho más bajos que el resto de correlaciones.

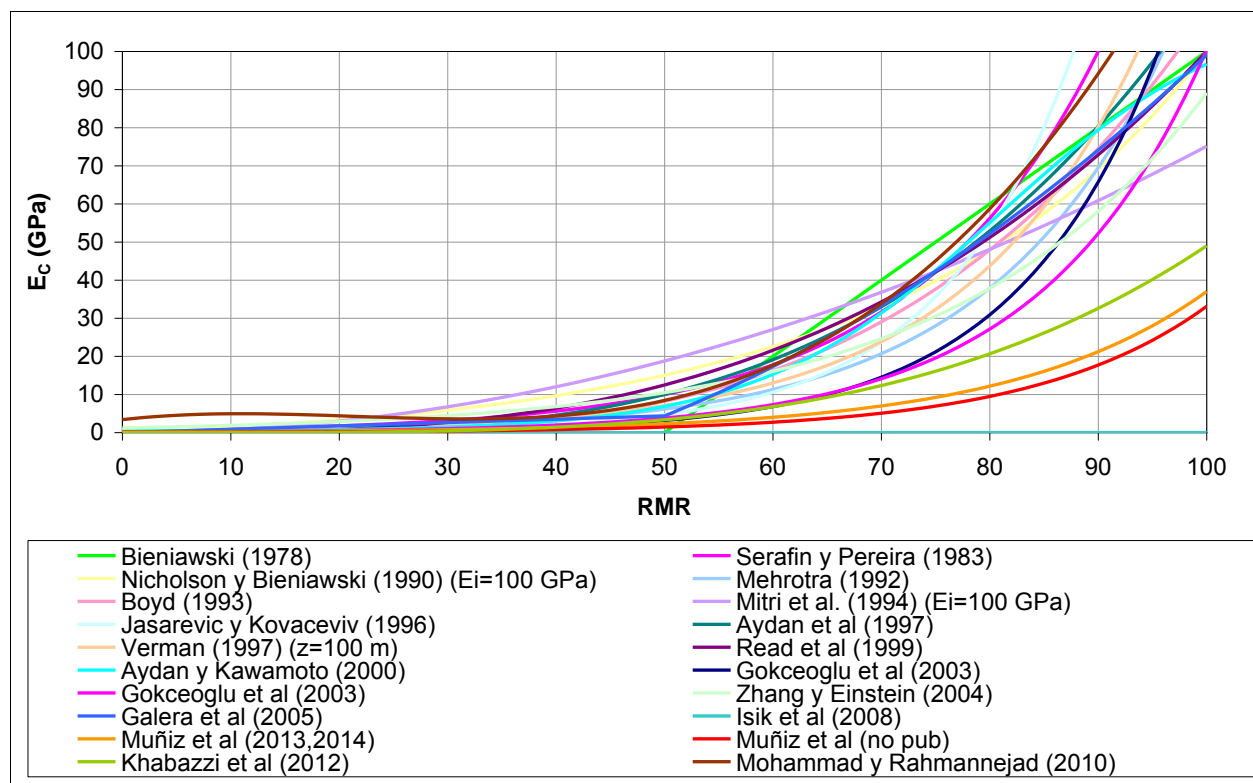


Figura I- 13. Comparación entre las diferentes correlaciones entre el  $E_c$  y el RMR

## CORRELACIONES BASADAS EN EL SISTEMA Q

### Barton (1983)

Barton (1983) utiliza los datos publicados por Bieniawski (1978), a los que añade datos aportados por Barton *et al.* (1980), para correlacionar el módulo de deformación con el índice Q basándose para ello se basa en la correlación clásica:

$$RMR = 44 + \ln Q$$

Como resultado del estudio propone la siguiente fórmula:



$$E_c = 25 \cdot \log Q$$

Los datos incluidos en el estudio tienen un rango de Q entre 2 y 40 y un módulo de deformación del macizo entre 3 y 50 GPa. Por tanto esta correlación no debe de ser utilizada para macizos de baja calidad geotécnica.

### **Barton (1995)**

Barton revisa en 1995 los datos utilizados por Bieniawski (1978) y Serafim y Pereira (1983) proponiendo una nueva correlación que abarca todos los posibles rangos calidad del macizo, permitiendo estimar la deformabilidad de macizos de poca calidad. No obstante esta correlación está pensada para macizos con roca matriz de resistencia media a alta.

$$E_c = 10 Q^{1/3}$$

Esta correlación resulta muy parecida a la propuesta por Serafim y Pereira (1983) para índices de calidad bajos y la estimación del módulo para macizos sanos es similar a la de la correlación propuesta por Barton (1983).

### **Barton (1996)**

En este trabajo, Barton utiliza el parámetro  $Q_c$  que completa al parámetro Q introduciendo en su fórmula la resistencia a compresión simple de la roca matriz:

$$Q_c = \left( \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \right) \cdot \frac{\sigma_c}{100} = Q \cdot \frac{\sigma_c}{100}$$

Utilizando este  $Q_c$  amplía la utilidad de la correlación presentada el año anterior (Barton, 1995) a macizos compuestos por roca matriz más débil. La expresión queda por tanto de la siguiente manera:

$$E_c = 10 Q_c^{1/3}$$

### **Singh y Bashin (1996)**

Singh y Bashin (1996) proponen la siguiente fórmula en la que introducen el valor del módulo de deformación de la roca matriz.

$$E_c = 1,5 \cdot Q^{0,6} \cdot E_I^{0,14}$$

## **Diederichs y Kaiser (1999)**

Hutchinson y Diederichs (1996) reanalizan los datos aportados por Barton (1983) y por Bieniawski (1989) teniendo en cuenta el efecto del confinamiento y de la alteración de las muestras. Diederichs y Kaiser (1999) modifican este trabajo y proponen la siguiente correlación en base a  $Q'$  y al grado de confinamiento para  $RMR > 40$  ó  $Q' > 1$ :

$$E_c = 7 \pm 3\sqrt{Q'}$$

Siendo:

$$Q' = \left( \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \right)$$

Y con la siguiente relación entre  $Q'$  y RMR:

$$Q' = 10^{\frac{RMR-44}{21}}$$

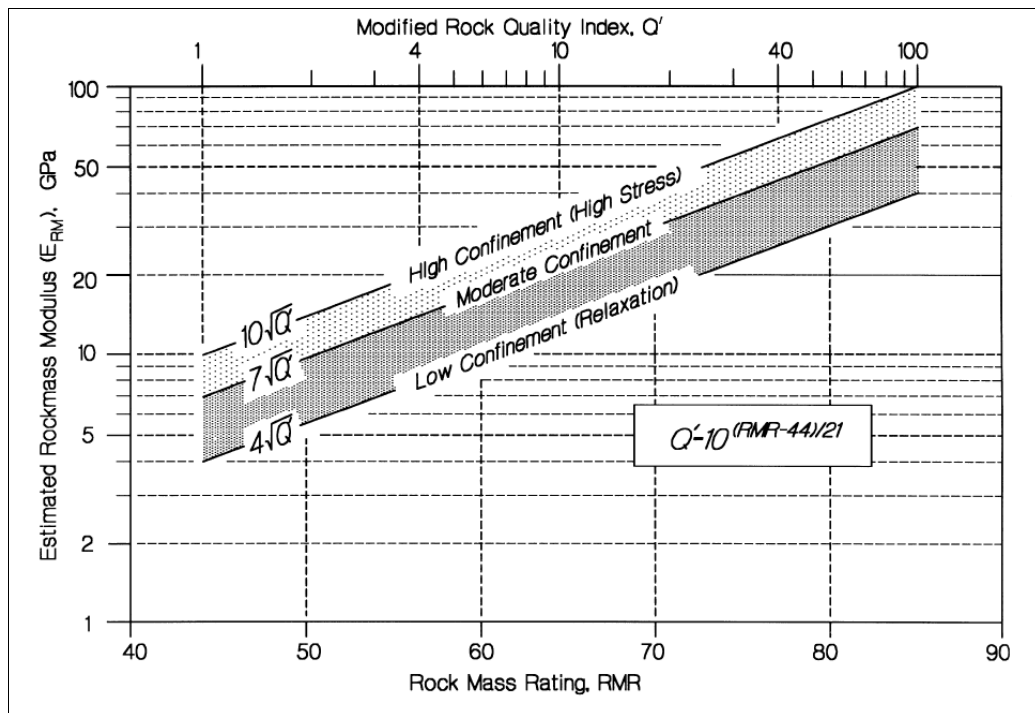


Figura I- 14. **Correlación propuesta por Diederichs y Kaiser (1999)**

## Palmstrom y Singh (2001)

Palmstrom y Singh (2001) añaden a los casos estudiados por (Barton (1996)) los recogidos por Clerici (1993) y numerosos ensayos in situ realizados por el *Central Soil and Materials Research Station* de Nueva Delhi. De este estudio concluyen una nueva correlación para el intervalo de Q entre 1 y 30.

$$E_c = 8 \cdot Q^{0,4}$$

En este trabajo los autores opinan que las correlaciones realizadas a partir de la Q solo deben de ser utilizadas para macizos masivos compuestos por rocas con resistencias a compresión simple por encima de 150 MPa.

## Comparación

En el Figura I-15 se muestran todas las correlaciones mencionadas en este apartado:

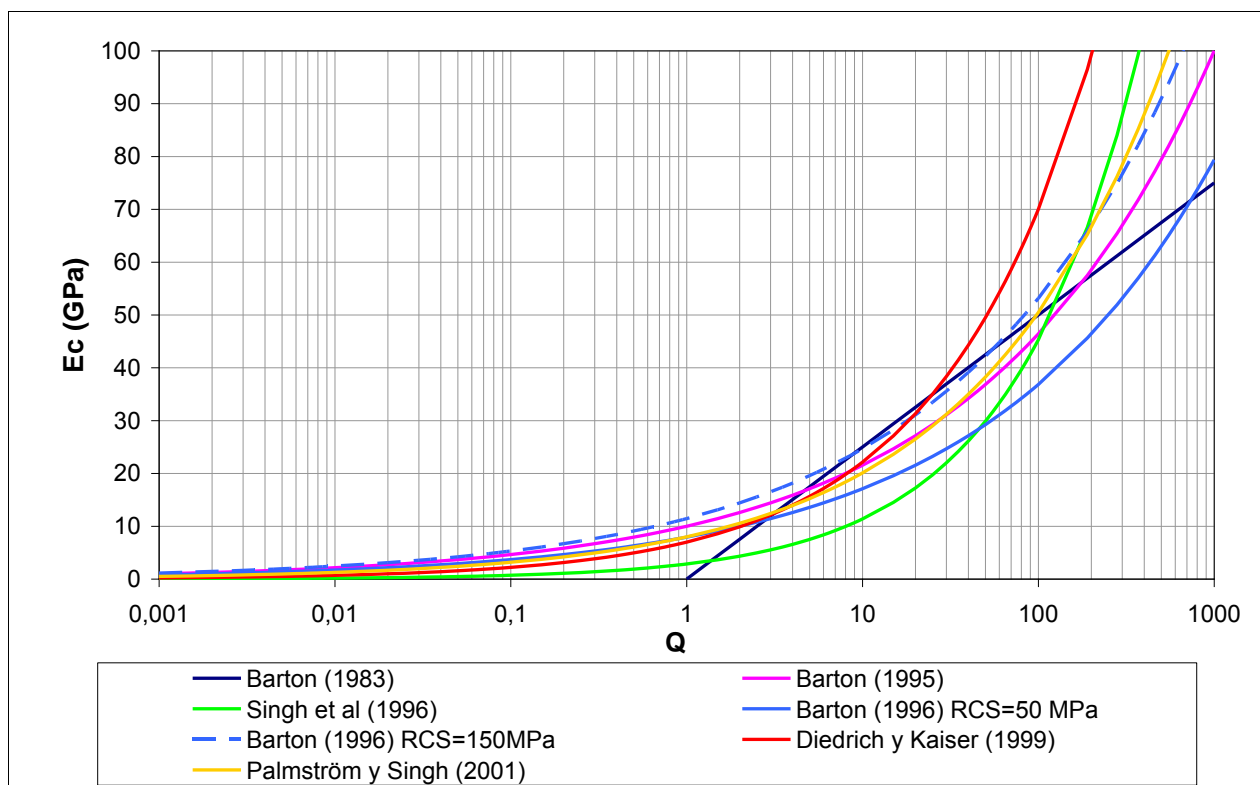


Figura I- 15. Comparación entre las diferentes correlaciones entre el EC y el valor de Q.

## CORRELACIONES BASADAS EN EL GSI

### Hoek y Brown (1997)

Hoek y Brown (1997), modifican la correlación de Serafim y Pereira (1983) para proponer una nueva formula que represente mejor el comportamiento de los macizos de peor calidad con resistencia a compresión simple de la roca matriz inferior a 100 MPa. Para ello basada en análisis de excavaciones realizadas en macizos de poca calidad geotécnica.

Una de las modificaciones es la introducción de la resistencia a compresión simple de la roca matriz. Esto se justifica desde el punto de vista de que, en los macizos de buena calidad geotécnica, la deformación está controlada principalmente por el comportamiento de las discontinuidades mientras que en macizos de peor calidad, la deformabilidad de la roca matriz cobra importancia. La segunda modificación es el cambio del RMR por el GSI.

$$E_c = \sqrt{\frac{RCS}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad \text{para } RCS < 100 \text{ MPa}$$

### Hoek et al. (2002)

Hoek et al. (2002) modifican la fórmula para introducir el posible efecto de las voladuras y la relajación de esfuerzos en el comportamiento del macizo. Este factor se denominó “D”.

$$E_c = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{RCS}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad \text{para } RCS < 100 \text{ MPa}$$

### Gokceoglu et al. (2003)

Como se vio en el apartado 0, Gokceoglu et al. (2003) proponen la siguiente correlación basada en el GSI:

$$E_c = 0,1451 \cdot e^{0,0654 \cdot GSI}$$

## **Sonmez et al. (2004)**

Sonmez *et al.* (2004) parten de la base teórica del criterio de rotura de Hoek y Brown. Asumen que la relación entre el módulo de deformación y la resistencia a compresión no confinada en el macizo rocoso y en la roca matriz son iguales cuando el GSI es igual a 100.

$$\frac{E_c}{RCS_c} = \frac{E_I}{RCS_I} \rightarrow E_c = RCS_M \cdot \left( \frac{E_I}{RCS_I} \right)$$

Dado que según el criterio de rotura de Hoek y Brown:

$$RCS_c = RCS_I \cdot s^a$$

siendo:

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9}}$$

$$a = 0,5 + \frac{1}{6} \left( e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right)$$

Según los autores esta fórmula es válida para GSI=100 y  $s^a=1$ . Para otros valores de GSI y  $s^a$  analizaron los mismos datos utilizados por Gokceoglu *et al.* (2003) llegando a la siguiente fórmula:

$$E_c = E_I \cdot (s^a)^{0.4}$$

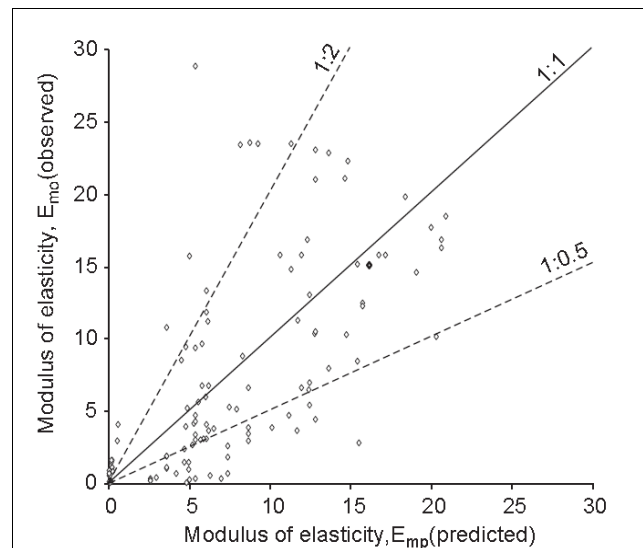


Figura I- 16. Variación entre los datos reales y los calculados por Sonmez *et al.* (2004)

El coeficiente de correlación obtenido (0,65), es menor al conseguido por Gokceoglu *et al.* (2003) utilizando los mismos datos (0,8).

## **Carvalho (2004)**

Basándose en las ecuaciones del criterio de rotura de Hoek y Brown propone la siguiente ecuación:

$$E_c = E_i s^{1/4}$$

Siendo:

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9}}$$

## **Hoek y Diederichs (2006)**

Hoek y Dierdrich publican el análisis de cerca de 500 datos provenientes de ensayos in-situ y *back-analysis* realizados en China y Taiwán. Estos datos son correlacionados con el índice GSI introduciendo en la función el factor de distorsión “D” del criterio de Hoek y Brown. Como resultado de este estudio proponen dos formulas de correlación.

Los autores recomiendan el uso de la primera cuando no existan datos fiables de las propiedades de la roca matriz:

$$E_c = 100 \cdot \left( \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{75+25D-GSI}{11}}} \right)$$

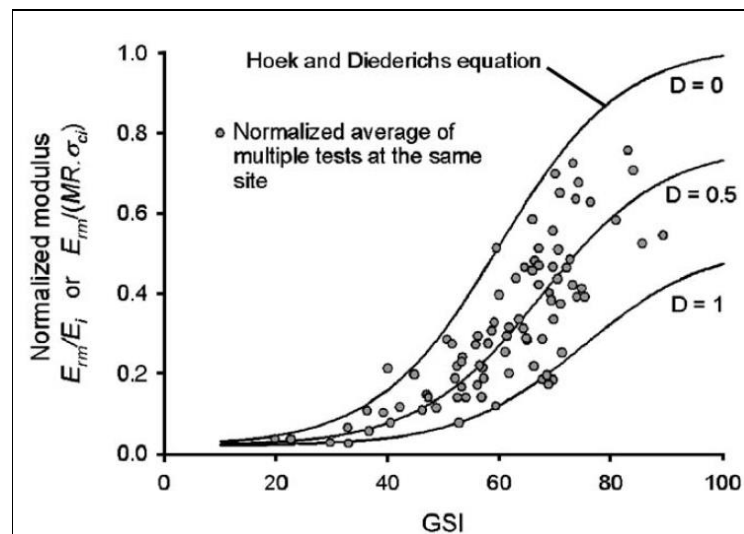


Figura I- 17. Correlación de Hoek y Diederichs (2006) Variación con el parámetro D

La segunda fórmula, a utilizar cuando existan datos suficientemente fiables de las propiedades de la roca matriz, incluye como parámetros de correlación, además de los mencionados anteriormente, en módulo de deformación de la roca matriz.

$$E_c = E_l \cdot \left( 0,02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{60+15D-GSI}{11}}} \right)$$

### **Beiki et al. (2010)**

Los datos utilizados en este trabajo provienen de ensayo de carga en placa realizados en las galerías de cuatro presas cimentadas en la formación Asmary (Irán). Esta formación, compuesta por calizas, areniscas, limolitas y argilitas cenozoicas, presenta un alto grado de fracturación.

En base a estos datos se obtienen, mediante análisis por red neuronal artificial, RNA (artificial neural network, AAA), las siguientes correlaciones:

$$E_c = \tan(\ln(GSI)) \log(\sigma_c) \sqrt[3]{RQD}$$

$$E_c = \tan\left(\sqrt{1.56 + (\ln(GSI))^2}\right) \sqrt[3]{\sigma_c}$$

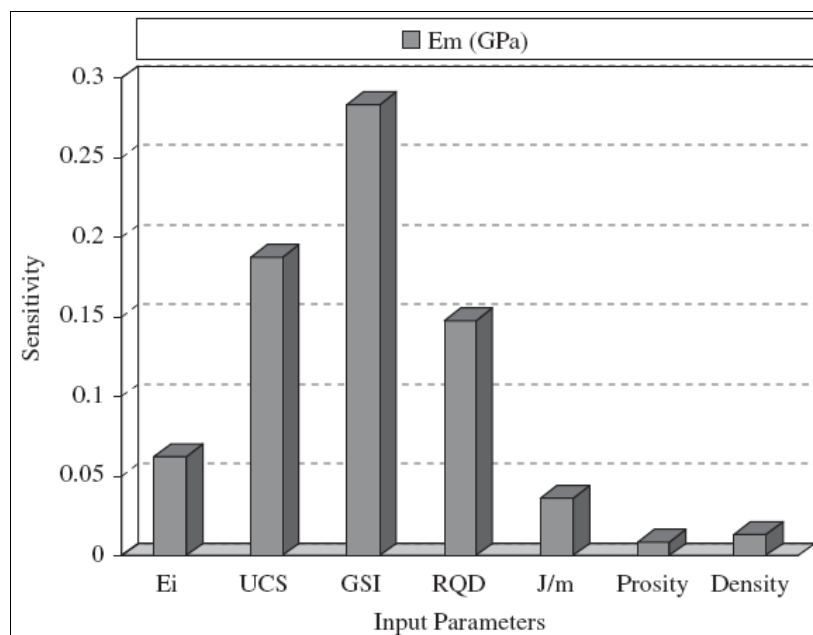


Figura I- 18. Análisis de sensibilidad de los diferentes parámetros estudiados (Beiki et al., 2010)

Esta correlación es válida para valores de GSI entre 40 y 65 y valores de RCS de entre 60 y 150 MPa.

## Comparación

A la vista del gráfico siguiente se observan valores muy bajos para la correlación de Isik *et al.* (2008). El resto de las curvas presentan una morfología similar a excepción de la correlación de Hoek y Diederichs (2006).

En el siguiente gráfico se muestran todas las correlaciones mencionadas en este apartado:

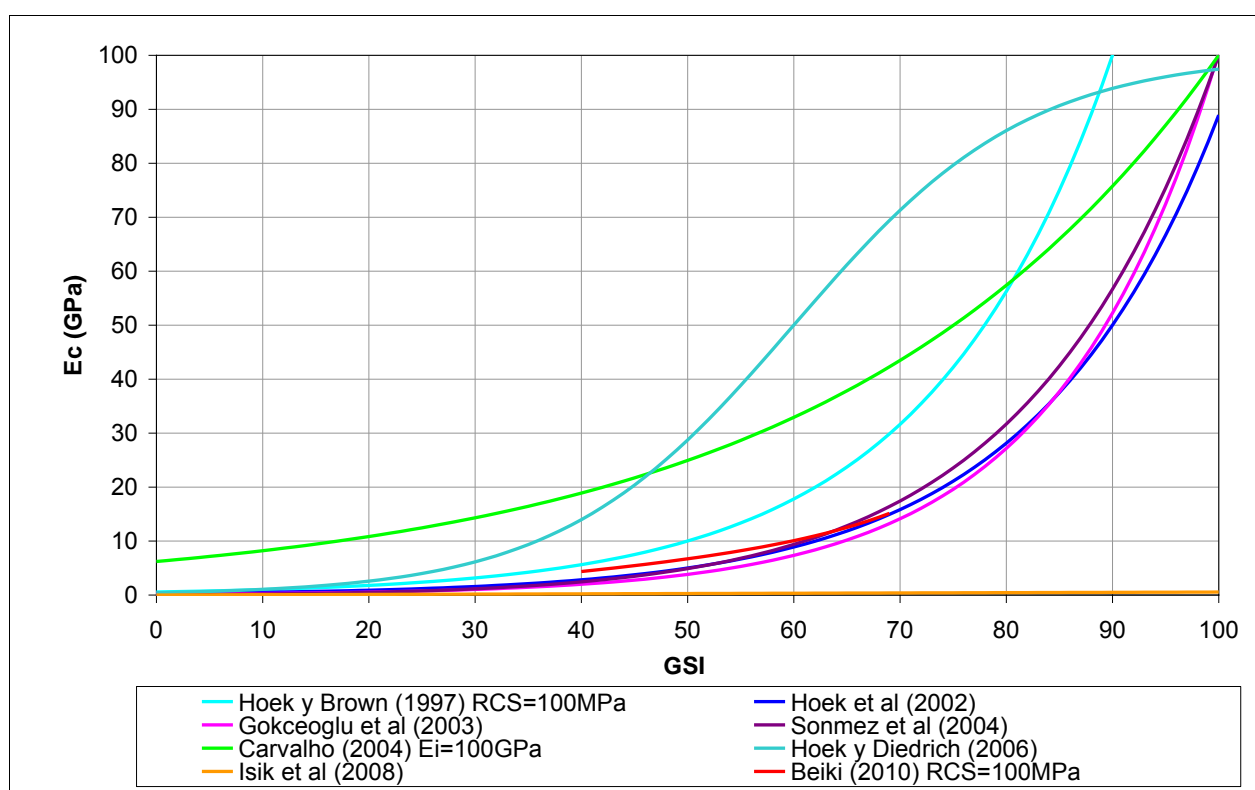


Figura I- 19. Comparación entre las diferentes correlaciones entre el  $E_c$  y el GSI

## OTRAS CORRELACIONES

A continuación se recogen varias correlaciones que utilizan parámetros distintos a las correlaciones geomecánicas más habituales.



## **Grujic (1974)**

Grujic (1974) propone estimar el módulo elástico del macizo en base a la medida de velocidad de propagación de ondas longitudinales. En su trabajo analiza los ensayos realizados en la presa de Mratingje (Montenegro) sobre calizas Triásicas con diferentes grados de fracturación, principalmente sanas y con indicios de procesos de disolución.

Para la correlación utiliza los resultados de 13 ensayos de gato plano y otras tantas medidas de ultrasonidos, obteniendo la siguiente formula.

$$E_c = 15,3 + 6,59 \frac{V_f - 3660}{1000}$$

## **Palmström (1995)**

Palmström (1995) publica su tesis doctoral en la que propone una nueva clasificación geomecánica para macizos rocosos, el Rock Mass Index (RMI). El mismo autor (Palmstrom, 1996a, 1996b) propone una correlación entre este nuevo índice y el módulo de deformación del macizo rocoso:

$$E_c = 5,6 \cdot RMI^{0,375}$$

## **Palmstrom y Singh (2001)**

Palmstrom y Singh (2001) corrigen la correlación anterior:

$$E_c = 7 \cdot RMI^{0,4}$$

Los autores de este trabajo concluyen que el RMI proporciona mejores estimaciones del módulo de deformación para macizos masivos que el RMR o la Q. Por otro lado sugieren que para macizos masivos compuestos por rocas blandas se estime el módulo de deformación a partir de ensayos de laboratorio debidamente corregidos para tener en cuenta el efecto escala.

## **Aydan et al. (2013)**

Los autores proponen una nueva clasificación geomecánica similar al RMR que denominan Rock Mass Quality Rating System (RQRS).

En base al análisis de varios ensayos *in situ* en macizos rocosos japoneses mediante y a la medida del RQRS, se proponen varias correlaciones entre este y diferentes parámetros geomecánicos del los macizos. En el caso del módulo de deformación proponen la siguiente ecuación, basada en la propuesta por Aydan y Kawamoto (2000).

$$E_c = E_0 - (E_0 - E_{100}) \frac{RMQR}{RMQR + 6(100 - RMQR)}$$

Donde  $E_0$  es el valor del módulo para RQSR = 0,  $E_{100}$  es el valor para RQSR =100.



## **APÉNDICE II**

### **DATOS EMPLEADOS EN EL ESTUDIO ESTADÍSTICO**



## **APÉNDICE II: DATOS EMPLEADOS EN EL ESTUDIO ESTADÍSTICO**

En este apéndice se recogen los datos empleados en el estudio estadístico.

Tabla II-1. Datos de la Unidad de Algeciras empleados en el estudio estadístico

Sondeo	Zona	Muestra	Prof. (m)	Grupo	γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	ω <sub>1</sub> (%)	ρ <sub>s</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	LL	IP	RCS (MPa)	Is <sub>90</sub> (MPa)	RTI (MPa)	E (MPa)	v	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s</sub> (m/s)	Edin (MPa)	E <sub>s</sub> MPa	Hinch (%)	P. Hinch (KPa)	ID2 (%)	Lugeon	Prem. Lefranc (m/s)	Referencia
Geo 5			41	Arcilloso	21.4							1,71												LPEE (1982)
Geo.5			48	Arcilloso	22,7					9,2			1149											LPEE (1982)
Geo.5			51	Arcilloso	23,1					19			1657											LPEE (1982)
Geo.5			77	Arcilloso	22,0					1,23			435											LPEE (1982)
Geo.5			77	Arcilloso	22,9					7,19			483											LPEE (1982)
Geo.5			77	Arcilloso	23,0					3,65			758											LPEE (1982)
Geo.5			77	Arcilloso	22,2							1,25												LPEE (1982)
Geo.5			77	Arcilloso	22,8																			LPEE (1982)
S-5			81	Arcilloso						6,26														SNED (1987)
S-5			82	Arcilloso						9,15														SNED (1987)
S-5			97	Arcilloso						17														SNED (1987)
S-5			149	Arcilloso						32,7		7,46												SNED (1987)
S-5			157	Arcilloso						38,4		2,42												SNED (1987)
S-5			167	Arcilloso						28,6		2,62												SNED (1987)
S-5			194	Arcilloso						31,2		2,52												SNED (1987)
	G. TARFA	M-15A		Arcilloso	24,2							1												Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-25		Arcilloso	20,7	3,51						0,9												Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-25		Arcilloso	20,7	3,51					0,46	0,9												Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-46 (1)		Arcilloso	24,1	3,44					1,36	0,8												Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-46 (2)		Arcilloso	23,3	3,70					0,48	1												Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-48 (1)		Arcilloso	22,6	5,08						1,1												Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-48 (2)		Arcilloso	22,8	5,53					0,75	1,6												Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-50		Arcilloso	23,0	6,05					0,72													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-60		Arcilloso	23,6	4,65					1,23	1,6												Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-60 (1)		Arcilloso	24,0	7,97					0,79		570	0,25										Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-62		Arcilloso	23,9	7,63					1,95		434	0,10										Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-62		Arcilloso	23,9	2,8					1,59	1,3												Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-65 (1)		Arcilloso	23,7	7,91					2,04		752	0,15										Geocontrol, 1995a
	G. TARFA			Arcilloso							1,16													Geocontrol, 1995a
G. principal	MALABATA		147	Arcilloso			2020																	LPEE (1994, 1995)
G. principal	MALABATA		147	Arcilloso			2500																	LPEE (1994, 1995)
G. principal	MALABATA		147	Arcilloso			2060																	LPEE (1994, 1995)
Segundo Pozo	MALABATA			Arcilloso			2240																	LPEE (1994, 1995)
Segundo Pozo	MALABATA			Arcilloso			2260																	LPEE (1994, 1995)
NIC HO -76	MALABATA		76	Arcilloso									210											SIMECSOL, 1997
NIC HO -76	MALABATA		76	Arcilloso									146											SIMECSOL, 1997
NIC HO -76	MALABATA		76	Arcilloso									175											SIMECSOL, 1997
NIC HO -76	MALABATA		76	Arcilloso									1460											SIMECSOL, 1997
NIC HO -76	MALABATA		76	Arcilloso									1160											SIMECSOL, 1997
Sondeo Este	MALABATA		147	Arcilloso									520											SIMECSOL, 1997
G Norte -147 m	MALABATA		147	Arcilloso									370											SIMECSOL, 1997
G Norte -147 m	MALABATA		147	Arcilloso									880											SIMECSOL, 1997
G Norte -147 m	MALABATA		147	Arcilloso									920											SIMECSOL, 1997
G Norte -147 m	MALABATA		147	Arcilloso									320											SIMECSOL, 1997
Sondeo Oeste	MALABATA			Arcilloso									540											SIMECSOL, 1997
Galería	MALABATA			Arcilloso									610											SIMECSOL, 1997
Principal	MALABATA			Arcilloso									280											SIMECSOL, 1997
Principal	MALABATA			Arcilloso									400											SIMECSOL, 1997
Principal	MALABATA			Arcilloso									99											SIMECSOL, 1997
Galería Norte	MALABATA			Arcilloso									220											SIMECSOL, 1997
Sondeo W	MALABATA			Arcilloso									260											SIMECSOL, 1997
Sondeo W	MALABATA			Arcilloso									210											SIMECSOL, 1997
Sondeo W	MALABATA			Arcilloso									48											SIMECSOL, 1997
Sondeo W	MALABATA		210	Arcilloso									230											SIMECSOL, 1997
Nicho -210	MALABATA		210	Arcilloso									430											SIMECSOL, 1997
Nicho -210	MALABATA		210	Arcilloso									240											SIMECSOL, 1997
Nicho -210	MALABATA		210	Arcilloso									1020											SIMECSOL, 1997
Nicho -210	MALABATA		210	Arcilloso									370											SIMECSOL, 1997
Sección armada	MALABATA			Arcilloso									161											SIMECSOL, 1997
Sección armada	MALABATA			Arcilloso									590											SIMECSOL, 1997
Sección armada	MALABATA			Arcilloso									260											SIMECSOL, 1997
-300 probing	MALABATA		300	Arcilloso									99											SIMECSOL, 1997
-300 probing	MALABATA		300	Arcilloso									430											SIMECSOL, 1997
-300 probing	MALABATA		300	Arcilloso									200											SIMECSOL, 1997
-300 probing	MALABATA		300	Arcilloso									350											SIMECSOL, 1997
-300 probing	MALABATA		300	Arcilloso									360											SIMECSOL, 1997
SP-1-12)	G. TARFA	18.5	62.5	Arcilloso									2193											CEDEX (2012)
SP-2-12)	G. TARFA	2.9	46.9	Arcilloso									1366											CEDEX (2012)
SP-2-12)	G. TARFA	5.5	49.5	Arcilloso									1267											CEDEX (2012)

Sondeo	Zona	Muestra	Prof. (m)	Grupo	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$n$ (%)	$\rho_{sp}$ (kg/m <sup>3</sup> )	LL	IP	RCS (MPa)	$I_{sp}$ (MPa)	RTI (MPa)	E (MPa)	v	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Edin (MPa)	E <sub>i</sub> MPa	E <sub>o</sub> MPa	Hinch. (%)	P. Hinch (kPa)	ID2 (%)	Lugon	Prem. Lefranc (m/s)	Referencia
G. TARFA	G. TARFA	8.5	52.5	Arcilloso														2228							CEDEX (2012)
SP-2 (2)	G. TARFA	11.5	55.5	Arcilloso														2068							CEDEX (2012)
SP-2 (2)	G. TARFA	14.7	58.7	Arcilloso														2197							CEDEX (2012)
S-5			111	Arcilloso							0.867														SECERG (1963b)
Geo.5				Arcilloso																					LPEE (1982)
SB-1	SB-1	26	26	Arcilloso	19.4	14.5		116	86	0.32															LPEE (1993)
SB-1	SB-1	31	31	Arcilloso	19.0	14.5		110	85																LPEE (1993)
SB-1	SB-1	50	50	Arcilloso	20.3	10.8		53	26	0.265															LPEE (1993)
SB-1	SB-1	65	65	Arcilloso	16.0	14.9		79	48	0.3															LPEE (1993)
SB-1	SB-1	109	109	Arcilloso	17.6	18.2		60	30																LPEE (1993)
SB-2	SB-2	15	15	Arcilloso	18.3	15		78	51												300				LPEE (1993)
SB-2	SB-2	34	34	Arcilloso	19.0	12		70	40												350				LPEE (1993)
SB-2	SB-2	52	52	Arcilloso	24.5	3.21			4.2						1968	1017	4895								LPEE (1993)
SB-2	SB-2	79	79	Arcilloso	23.6	2.6						1.6			2053	1300	5568								LPEE (1993)
SB-3	SB-3	16	16	Arcilloso	19.8	9		112	76																LPEE (1993)
SB-3	SB-3	38	38	Arcilloso	20.0	2.5																			LPEE (1993)
SB-3	SB-3	65	65	Arcilloso	19.0	10																			LPEE (1993)
SB-3	SB-3	75	75	Arcilloso	20.1	11.5		70	40																LPEE (1993)
SB-3	SB-3	86	86	Arcilloso	18.0	10		79	47																LPEE (1993)
SB-3	SB-3	110	110	Arcilloso	23.7					7.74					1700	1020	3847								LPEE (1993)
SB-3	SB-3	150	150	Arcilloso	24.7					12.3					1739	1009	4158								LPEE (1993)
SB-4	SB-4	28	28	Arcilloso	24.8	4		45	21																LPEE (1993)
SB-4	SB-4	31	31	Arcilloso	25.5																				LPEE (1993)
SB-4	SB-4	50	50	Arcilloso	18.0	8		48	32						3220	2240	9612				130				LPEE (1993)
SB-4	SB-4	65	65	Arcilloso	19.8	13																			LPEE (1993)
SB-4	SB-4	75	75	Arcilloso	19.4	2.1			14.9						2553	1500	8859								LPEE (1993)
SB-4	SB-4	109	109	Arcilloso	24.6	1.9																			LPEE (1993)
SB-4	SB-4	124	124	Arcilloso	23.3	7				0.58					4103	2286	21409								LPEE (1993)
SB-4	SB-4	144	144	Arcilloso	19.2	13		77	49																LPEE (1993)
SB-5	SB-5	45	45	Arcilloso	21.6	7.4		46	22																LPEE (1993)
SB-5	SB-5	54	54	Arcilloso	20.3	11.3		41	20												40				LPEE (1993)
SB-5	SB-5	105	105	Arcilloso	18.4	13		57	34												120				LPEE (1993)
SB-5	SB-5	115	115	Arcilloso	21.0	10.4		50	24												90				LPEE (1993)
SB-5	SB-5	150	150	Arcilloso	16.5	21		70	40												200				LPEE (1993)
SB-6	SB-6	42	42	Arcilloso	19.2	14		52	26	0.88			600												LPEE (1993)
SB-6	SB-6	45	45	Arcilloso	21.8	8		40	19	39.5															LPEE (1993)
SB-6	SB-6	150	150	Arcilloso	22.7			21.1							2364	1529	7041								LPEE (1993)
SB-7	SB-7	14	14	Arcilloso	17.6	8		50	24												12				LPEE (1993)
SB-7	SB-7	28	28	Arcilloso	19.5	11		55	30	0.15															LPEE (1993)
SB-7	SB-7	22	22	Arcilloso	19.1	11		60	33												300				LPEE (1993)
SB-7	SB-7	67	67	Arcilloso	20.0	14		76	47																LPEE (1993)
SB-7	SB-7	78	78	Arcilloso	25.8							3.75													LPEE (1993)
SB-7	SB-7	88	88	Arcilloso	25.1					6.1															LPEE (1993)
SB-10	SB-10	20	20	Arcilloso	22.0	7		41	21						3875	2153	20538				80				LPEE (1993)
SB-10	SB-10	32	32	Arcilloso	17.2	18																			LPEE (1993)
SB-10	SB-10	36	36	Arcilloso	17.7	19		100	67																LPEE (1993)
SP-1 (1)		11.5	66.5	Arcilloso														1475							CEDEX (2012)
SP-1 (1)		14.5	69.5	Arcilloso														1852							CEDEX (2012)
SP-1 (1)		17.7	72.7	Arcilloso														5456							CEDEX (2012)
G. TARFA	MALABATA	109	56	Arcilloso														1457							García González, 1966
Pozo principal	MALABATA	12.3	12.3	Arcilloso		2020																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	22	22	Arcilloso		1950																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	26.7	26.7	Arcilloso		2000																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	32.6	32.6	Arcilloso		1820																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	43.4	43.4	Arcilloso		1820																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	55.3	55.3	Arcilloso		2050																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	66.6	66.6	Arcilloso		1820																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	77.7	77.7	Arcilloso		2020																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	107	107	Arcilloso		2130																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	119	119	Arcilloso		2620																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	127	127	Arcilloso		2150																			LPEE (1994, 1995)
G. principal	MALABATA	57.5	57.5	Arcilloso		2090																			LPEE (1994, 1995)
Galería principal -147m	MALABATA	62.5	62.5	Arcilloso		2080																			LPEE (1994, 1995)
Galería principal -147m	MALABATA	66	66	Arcilloso		2110																			LPEE (1994, 1995)
Galería principal -147m	MALABATA	95	95	Arcilloso		2300																			LPEE (1994, 1995)
Galería principal -147m	MALABATA	34	34	Arcilloso		2300																			LPEE (1994, 1995)
Galería principal -147m	MALABATA	42	42	Arcilloso		2290																			LPEE (1994, 1995)
Galería principal -147m	MALABATA	76	76	Arcilloso		2147																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	76	76	Arcilloso		2210																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	120	120	Arcilloso		2130																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	120	120	Arcilloso		2200																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	120	120	Arcilloso		2130																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	120	120	Arcilloso		2200																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	120	120	Arcilloso		2130																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	120	120	Arcilloso		2200																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	120	120	Arcilloso		2130																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	120	120	Arcilloso		2200																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	120	120	Arcilloso		2130																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	120	120	Arcilloso		2200																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	120	120	Arcilloso		2130																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	120	120	Arcilloso		2200																			LPEE (1994, 1995)
Pozo principal	MALABATA	120	120	Arcilloso																					



Sondeo	Zona	Muestra	Prof. (m)	Grupo	$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	LL	IP	RCS (MPa)	$I_{sp}$ (MPa)	RTI (MPa)	E (MPa)	v (mm)	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s</sub> (m/s)	Edin (MPa)	E <sub>s</sub> MPa	E <sub>s</sub> MPa	Hinch. (%)	P. Hinch (KPa)	D2 (%)	Prem. Lateral (m/s)	Referencia
Galería Este	MALABATA	GE-2	147	Arcilloso		2280																	MECASOL
	Galería Este	EVG7 (SE5)	147	Arcilloso		2210																	MECASOL
	MALABATA	EVG7 (SE5)	147	Arcilloso		2280																	MECASOL
	Galería Este	EVG7 (SE5)	147	Arcilloso		2240																	MECASOL
	G. TARFA	5	60	Arcilloso														1041					CEDEX (2012)
	G. TARFA	7.5	62.5	Arcilloso														745					CEDEX (2012)
	G. TARFA	10.5	65.5	Arcilloso														1294					CEDEX (2012)
	G. TARFA	12.5	67.5	Arcilloso														1874					CEDEX (2012)
	G. TARFA	16.5	71.5	Arcilloso														3063					CEDEX (2012)
	G. TARFA	19.5	74.5	Arcilloso														5130					CEDEX (2012)
G. principal	G. TARFA	6939-I	67	Arcilloso	25.0	1.4								2929	992		6261						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6939-II	67	Arcilloso	24.7	7.1			5.1					2455	675		3031						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6939-III	67	Arcilloso	24.6	6.7			5.5					2568	657		2903						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6939-IV	67	Arcilloso	26.6	1.65								3364	1261		10331						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6939-V	67	Arcilloso	24.4	7			5.2					2920	1077		6942						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6939-V	67	Arcilloso	24.5	6.9			5.9					2990	1495		10967						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6939-VI	67	Arcilloso	24.5	6.8			8.3					3158	1224		8811						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6939-VII	67	Arcilloso	24.5	2.8			19.1					2888	1380		9749						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6939-VIII	67	Arcilloso	24.6	6.9			5.7					2948	1440		10427						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6941-I	70	Arcilloso	25.1	1.4								3567	1493		12877						CEDEX (2012)
Segundo Pozo	G. TARFA	6941-II	70	Arcilloso	25.1	5.7			8.3					3715	1365		11524						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6941-III	70	Arcilloso	25.6	4.1			10.5					4087	1269		10734						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6941-IV	70	Arcilloso	25.6	1								3491	1085		7871						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6941-V	70	Arcilloso	25.6	3.5			11.5					4098	1389		12659						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6941-V	70	Arcilloso	25.6	4.3			9.8					3508	1070		7717						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6941-VI	70	Arcilloso	25.8	3.8			16					3808	1291		10915						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6941-VII	70	Arcilloso	25.4	1.2								3867	1141		8645						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6941-VIII	70	Arcilloso	24.7	4.8			7.4					3256	1029		6798						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6941-IX	71	Arcilloso	25.7									8447	1027		1532						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6942-I	71	Arcilloso	25.9				18.8					8447	1027		1532						CEDEX (2012)
G. principal	G. TARFA	6942-II	71	Arcilloso	25.7									4643	1302		11776						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6942-III	71	Arcilloso	25.7									0.46	4285		1638						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6942-IV	71	Arcilloso	25.7									0.46	4285		1638						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6942-V	71	Arcilloso	25.7									7165	0.10	4070		1308					CEDEX (2012)
	G. TARFA	6942-VI	71	Arcilloso	25.9									8097	0.40	4354		1370					CEDEX (2012)
	G. TARFA	6942-VII	71	Arcilloso	26.0									13798	0.24	4046		1293					CEDEX (2012)
	G. TARFA	6943-I	73	Arcilloso	25.6									3246	1953		15080						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6943-II	73	Arcilloso	25.5									0.43	3930		1450						CEDEX (2012)
	G. TARFA	6943-III	73	Arcilloso	25.0									5534	0.38	3731		984					CEDEX (2012)
	G. TARFA	6943-IV	73	Arcilloso	25.1									6436	0.40	4162		2062					CEDEX (2012)
G. principal	G. TARFA	6943-V	73	Arcilloso	25.1									3513	0.30	3366		1062					CEDEX (2012)
	G. TARFA	6943-X	73	Arcilloso	25.1																		CEDEX (2012)
	G. TARFA	6943-XII	73	Arcilloso	21.9	4.60					1.502												CEDEX (2012)
	G. TARFA	6944-I	74.5	Arcilloso	26.0									7856	0.35	4169		1436					CEDEX (2012)
	G. TARFA	6944-IV	74.5	Arcilloso	25.9									8447	0.25	4436		1190					CEDEX (2012)
	G. TARFA	6944-IX	74.5	Arcilloso	25.5									6437	0.30	4348		1335					CEDEX (2012)
	G. TARFA	6944-V	74.5	Arcilloso	25.7	3.61					1.738			4437	0.26	4269		1881					CEDEX (2012)
	G. TARFA	6944-VIII	74.5	Arcilloso	25.7									3744	0.35	4032		1229					CEDEX (2012)
	G. TARFA	6944-X	74.5	Arcilloso	25.8									9017	0.50	4263		1356					CEDEX (2012)
	G. TARFA	6944-X	74.5	Arcilloso	25.8																		LPEE (1994, 1996)
Segundo Pozo	MALABATA	44	44	Arcilloso		2150																	LPEE (1994, 1996)
	G. TARFA	289	289	Arcilloso		2280																	LPEE (1994, 1996)
	G. TARFA	215	215	Arcilloso														2136					CEDEX (2012)
	G. TARFA	5	60	Arcilloso														2586					CEDEX (2012)
	G. TARFA	8.5	63.5	Arcilloso														3837					CEDEX (2012)
	G. TARFA	120	120	Arcilloso																			MECASOL
	MALABATA	120	120	Arcilloso		2430																	MECASOL
	MALABATA	120	120	Arcilloso		2370																	MECASOL
	MALABATA	EVG301	300	Arcilloso		2230																	MECASOL
	MALABATA	EVG301	300	Arcilloso		2180																	MECASOL
G. principal	MALABATA	EVG302	300	Arcilloso		2070																	MECASOL
	MALABATA	EVG302	300	Arcilloso		2090																	MECASOL
	MALABATA	EVG302	300	Arcilloso		2340																	MECASOL
	MALABATA	EVG302	300	Arcilloso		2270																	MECASOL
	MALABATA	EVG302	300	Arcilloso		2200																	MECASOL
	MALABATA	87	147	Arcilloso																			LPEE (1994, 1996)
	G. TARFA	212	40	Arcilloso														1085					García González, 1996
	G. TARFA	212	40	Arcilloso														1153					García González, 1996
	G. TARFA	235	45	Arcilloso																			García González, 1996
	G. TARFA	280	58	Arcilloso																			García González, 1996
Segundo Pozo	G. TARFA	2.5	46.5	Arcilloso																			García González, 1996
	G. TARFA	5.2	49.2	Arcilloso																			García González, 1996
	G. TARFA	7.5	51.5	Arcilloso																			García González, 1996
	G. TARFA	16.5	60.5	Arcilloso																			García González, 1996
	G. TARFA	6947-I	49.5	Arcilloso	24.2	1.70																	CEDEX (2012)
	G. TARFA	6947-II	49.5	Arcilloso	24.4	1.90																	CEDEX (2012)
	G. TARFA	6947-III	49.5	Arcilloso	24.5	1.80																	CEDEX (2012)
	G. TARFA	6947-IV	49.5	Arcilloso	24.8	2.10																	CEDEX (2012)
	G. TARFA	6947-V	49.5	Arcilloso	24.7	1.50																	CEDEX (2012)
	G. TARFA	6947-VI	49.5	Arcilloso	24.3	1.80																	CEDEX (2012)
Segundo Pozo	G. TARFA	6947-VII	49.5	Arcilloso	24.3	1.80																	CEDEX (2012)
	G. TARFA	6947-VIII	49.5	Arcilloso	24.3	1.80																	CEDEX (2012)
	G. TARFA	6947-IX	49.5	Arcilloso	24.4	1.90																	CEDEX (2012)
	G. TARFA	6947-X	49.5	Arcilloso	24.5	1.80																	CEDEX (2012)
	G. TARFA	6947-XI	49.5	Arcilloso	24.6	2.10																	CEDEX (2012)
	G. TARFA	6947-XII	49.5	Arcilloso	24.7	1.50																	CEDEX (2012)
	G. TARFA	6947-XIII	49.5	Arcilloso	24.8	2.10																	CEDEX (2012)
	G. TARFA	6947-XIV	49.5	Arcilloso	24.9	2.10																	CEDEX (2012)
	G. TARFA	6947-XV	49.5	Arcilloso	24.9	2.10																	

Sondeo	Zona	Muestra	Prof. (m)	Grupo	$\gamma_{so}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	$\rho_{so}$ (kg/m <sup>3</sup> )	LL	IP	RCS (MPa)	$I_{so}$ (MPa)	RTI (MPa)	E (MPa)	v	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Edin (MPa)	E <sub>s</sub> MPa	Hindh. (%)	P. Hinch (kPa)	ID2 (%)	Lugom	Prem. Lefranc (m/s)	Referencia	
SM-1(2)	G. TARFA	6947-VIII	49.5	Arcilloso	24.7	2.00							1314	0.21	3100	851	4821							CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6947-X	49.5	Arcilloso	24.8	2.20							2724	0.38	3306	878	5195							CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6947-XV	49.5	Arcilloso	25.1	2.00									2954	800	4356							CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6948-I	51	Arcilloso	24.7	6.40					6.7													CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6948-II	51	Arcilloso	24.7	2.30																		CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6948-III	51	Arcilloso	24.6	5.90					8.8													CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6948-IV	51	Arcilloso	24.6	2.10																		CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6948-V	51	Arcilloso	24.6	5.90					6.1													CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6948-VI	51	Arcilloso	24.6	6.00					4.4													CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6948-VII	51	Arcilloso	24.6	2.10																		CEDEX (2012)	
SM-1(2)	G. TARFA	6948-VIII	51	Arcilloso	25.0	5.50					7.7													CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6948-IX	51	Arcilloso	24.9	5.80					7.6													CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6953-I	58	Arcilloso	24.9								2554	0.20	3216	1178	8516							CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6953-II	58	Arcilloso	25.0								3818		3405	1055	7285							CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6953-III	58	Arcilloso	25.0								6069		3513	1127	8223							CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6953-IV	58	Arcilloso	24.9								2489	0.20	3018	940	5743							CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6953-V	58	Arcilloso	24.9								3805	0.23	3458	1162	8556							CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6953-VI	58	Arcilloso	24.8								5347		2966	972	6036							CEDEX (2012)	
	G. TARFA	6953-VII	58	Arcilloso	24.8																				CEDEX (2012)
	G. principal	MALABATA	84.5	147	Arcilloso			2070																	LPEE (1994, 1995)
G. principal	MALABATA	86	147	Arcilloso			2200																		LPEE (1994, 1995)
	MALABATA	88	147	Arcilloso			2250																		LPEE (1994, 1995)
	G. principal	37	37	Arcilloso																					CEDEX (1984)
	S-5	67	67	Arcilloso							1.5														CEDEX (1984)
	S-5	77	77	Arcilloso																					CEDEX (1984)
	S-5	87	87	Arcilloso																					CEDEX (1984)
	S-5	97	97	Arcilloso																					CEDEX (1984)
	S-5	147	147	Arcilloso								2.9													CEDEX (1984)
	S-5	166	166	Arcilloso																					CEDEX (1984)
	S-5	177	177	Arcilloso																					CEDEX (1984)
S-5		228	228	Arcilloso							2.5														CEDEX (1984)
	S-5	281	281	Arcilloso							2.1														CEDEX (1984)
	S-5	292	292	Arcilloso																					CEDEX (1984)
	S-5	301	301	Arcilloso																					CEDEX (1984)
	S-5	97	97	Arcilloso		1.2				13.4															CEDEX (1984)
	G. TARFA			Arcilloso	24.0	1.84						1.9	6322	0.20											Geocontrol, 1995a
	G. TARFA			Arcilloso	24.5	1.84				19.6			5811	0.33											Geocontrol, 1995a
	G. TARFA			Arcilloso	23.8	3.55				13.5															Geocontrol, 1995a
	G. TARFA			Arcilloso	23.6	3.42						2.6													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA			Arcilloso	24.6	2.83				12.8				5539	0.18										Geocontrol, 1995a
M-13A(2)	G. TARFA			Arcilloso	24.2	2.23						2.6													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA			Arcilloso	24.3	2.16				16.3			5045	0.20											Geocontrol, 1995a
	G. TARFA			Arcilloso	24.2	2.35						2.8													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA			Arcilloso	24.3	2.08				15.8				3287	0.27										Geocontrol, 1995a
	G. TARFA			Arcilloso	23.6	2						3.1													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA			Arcilloso	23.9	2.33																			Geocontrol, 1995a
	G. TARFA			Arcilloso	24.1	3.51						6.4	8909	0.29										Geocontrol, 1995a	
	G. TARFA			Arcilloso	25.4	3.49				27		1.9	10515	0.28										Geocontrol, 1995a	
	G. TARFA			Arcilloso	24.5	3.28							1.6												Geocontrol, 1995a
	G. TARFA			Arcilloso	25.5	2.87						3.3													Geocontrol, 1995a
S-5		45	45	Arcilloso							1.5														SECEG (1983b)
	S-5	66	66	Arcilloso							1.7														SECEG (1983b)
	S-5	73	73	Arcilloso							1.6														SECEG (1983b)
	S-5	77	77	Arcilloso							0.7														SECEG (1983b)
	S-5	80	80	Arcilloso							2.5														SECEG (1983b)
	S-5	85	85	Arcilloso							1.1														SECEG (1983b)
	S-5	89	89	Arcilloso							2.9														SECEG (1983b)
	S-5	92	92	Arcilloso							1.3														SECEG (1983b)
	S-5	95	95	Arcilloso							1.8														SECEG (1983b)
	S-5	99	99	Arcilloso							3.8														SECEG (1983b)
S-5		102	102	Arcilloso							2.2														SECEG (1983b)
	S-5	104	104	Arcilloso							1.6														SECEG (1983b)
	S-5	120	120	Arcilloso							1.2														SECEG (1983b)
	S-5	146	146	Arcilloso							2.5														SECEG (1983b)
	S-5	167	167	Arcilloso							2.6														SECEG (1983b)
	S-5	180	180	Arcilloso							2.1														SECEG (1983b)
	S-5	218	218	Arcilloso							1.6														SECEG (1983b)
	S-5	231	231	Arcilloso							1.6														SECEG (1983b)
	S-5	234	234	Arcilloso							2.4														SECEG (1983b)
	S-5	243	243	Arcilloso							1.6														SECEG (1983b)
S-5		246	246	Arcilloso							1.4														SECEG (1983b)
	S-5	252	252	Arcilloso							0.7														SECEG (1983b)
	S-5	256	256	Arcilloso							0.6														SECEG (1983b)
	S-5	262	262	Arcilloso							2.2														SECEG (1983b)
	S-5	282	282	Arcilloso							0.8														SECEG (1983b)
	S-5	286	286	Arcilloso							2.0														SECEG (1983b)

Sondeo	Zona	Muestra	Prof (m)	Grupo	$\gamma_p$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (%)	$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	LL	IP	RCS (MPa)	$I_{sc}$ (MPa)	RTI (MPa)	E (MPa)	v	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Edin (MPa)	E <sub>u</sub> MPa	Hinch. (%)	P Hinch (kPa)	ID2 (%)	Prem.		Referencia	
																						Lugoson	Leifranc (m/s)		
SB-5		25	25	Arcilloso	22.0	9		39	19	0.34			200			5375	3127	35413			20			LPEE (1993)	
SB-6		15	15	Arcilloso	22.0																			LPEE (1993)	
SB-6		81	81	Arcilloso	21.7					67.8		12.9			6400	2860	33562							LPEE (1993)	
SB-6		115	115	Arcilloso	22.7					15.1		4.7			7222	2853	39307							LPEE (1993)	
SB-6		135	135	Arcilloso	17.3										5220	2166	18759							LPEE (1993)	
Geo.5		20	20	Arcilloso															17.3					SNED (1984)	
Geo.5		41	41	Arcilloso															1.9					SNED (1984)	
Geo.5		45	45	Arcilloso															0.16					SNED (1984)	
Geo.5		67	67	Arcilloso															7.4					SNED (1984)	
Geo.5		67	67	Arcilloso															6.3					SNED (1984)	
Geo.5		77	77	Arcilloso															7.7					SNED (1984)	
Geo.5		77	77	Arcilloso															6.8					SNED (1984)	
Geo.5		77	77	Arcilloso															4.8					SNED (1984)	
Geo.5		79	79	Arcilloso															6.4					SNED (1984)	
Geo.5		79	79	Arcilloso															5					SNED (1984)	
Geo.5		82	82	Arcilloso															8					SNED (1984)	
Geo.5		20	20	Arcilloso															11.3					SNED (1984)	
Geo.5		78	78	Arcilloso															2.7					SNED (1984)	
Geo.5		30	30	Arcilloso															6.7					SNED (1984)	
	G-TARIFA	M-68		Calcareo	25.2	1.43				30.25			242	0.13											Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-69		Calcareo	25.7	0.96							58												Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-70		Calcareo	26.6	0.4				76.69		9.074	743	0.33											Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-72		Calcareo	25.8	0.45						5.726	1297	0.31											Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-73		Calcareo	26.6	0.29				25.48															Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-74		Calcareo	26.5	1.08						6.447													Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-75		Calcareo	26.0	1.71				33.55		4.016	539	0.33											Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-76		Calcareo	24.9	1.19				9.09			86	0.24											Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-77		Calcareo	26.2	1.29																			Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-54		Calcareo	24.7	3.6																			Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-54 (1)		Calcareo	25.2	5.1						1.2													Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-54 (2)		Calcareo	25.2	4.91							9176												Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-55		Calcareo	25.2	2.26						2.6	4252	0.15											Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-56 (1)		Calcareo	25.0	6.14							2776	0.20											Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-58		Calcareo	25.4	1.92							2187	0.22											Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-58 (1)		Calcareo	24.8	3.7						3													Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-58 (2)		Calcareo	25.0	2.55						2.2													Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-58 (3)		Calcareo	24.4	3.3						1.6													Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-59		Calcareo	25.4	5.17							4665	0.29											Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-59 (1)		Calcareo	23.6	3.81						1.2													Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-59 (2)		Calcareo	24.3	3.8						2.2													Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-66		Calcareo	25.9	2.94							5857												Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-67 (1)		Calcareo	26.2	0.96						4.6													Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-67 (2)		Calcareo	26.3	0.72						4.7													Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	352	87	Calcareo							3.32							79							García González, 1996
	G-TARIFA	355	87	Calcareo							2.16							63							García González, 1996
	G-TARIFA	362	88	Calcareo														708							García González, 1996
	G-TARIFA	362	88	Calcareo							4.24							2266							García González, 1996
	G-TARIFA	372	88	Calcareo							5.54							290							García González, 1996
	G-TARIFA	372	88	Calcareo														541							García González, 1996
	G-TARIFA	378	90	Calcareo															1889						García González, 1996
	G-TARIFA	378	90	Calcareo														2000							García González, 1996
	G-TARIFA	388	89	Calcareo														1005							García González, 1996
	G-TARIFA	388	89	Calcareo														806							García González, 1996
SP-1-(3)		4.5	92.3	Calcareo														1418							CEDEX (2012)
SP-1-(3) BIS		10	98	Calcareo														966							CEDEX (2012)
SP-1-(3) BIS		15.6	103.6	Calcareo														385							CEDEX (2012)
SP-1-(3) BIS		19.5	107.5	Calcareo														520							CEDEX (2012)
SP-2-(3)		2	90	Calcareo														1925							CEDEX (2012)
SP-2-(3)		4	92	Calcareo														11343							CEDEX (2012)
SP-2-(3) BIS		4.5	92.5	Calcareo														1159							CEDEX (2012)
SP-2-(3) BIS		7.1	95.1	Calcareo														429							CEDEX (2012)
SP-2-(3) BIS		11.7	99.7	Calcareo														2040							CEDEX (2012)
SP-2-(3) BIS		13.9	101.9	Calcareo														985							CEDEX (2012)
SM-1-(3)	G. TARIFA	6961-I	96.5	Calcareo	26.1					101.7			52442	0.50	5886	2407	35230								CEDEX (2012)
SM-1-(3)	G. TARIFA	6961-II	96.5	Calcareo	26.0					92		8.256	70846	0.43	6215	2004	26969								CEDEX (2012)
SM-1-(3)	G. TARIFA	6961-III	96.5	Calcareo	26.0	0.61						7.025													CEDEX (2012)
SM-1-(3)	G. TARIFA	6961-IV	96.5	Calcareo	23.8	0.84																			CEDEX (2012)
SM-1-(3)	G. TARIFA	6961-V	96.5	Calcareo	25.7					46.7			46693	0.34	5856	1562	17049								CEDEX (2012)
SM-1-(3)	G. TARIFA	6961-VII	96.5	Calcareo	26.1					66			55798	0.48	5930	1954	25565								CEDEX (2012)
SM-1-(3)	G. TARIFA	6961-VIII	96.5	Calcareo	25.9					40			47138	0.14	5869	1937	24943								CEDEX (2012)
SM-1-(3)	G. TARIFA	6961-IX	96.5	Calcareo	26.1																				CEDEX (2012)
SM-1-(3)	G. TARIFA	6961-XIII	96.5	Calcareo	26.0	0.6						7.71													CEDEX (2012)
SM-1-(3)	G. TARIFA	6962-I	98	Calcareo	26.1	0.70				70															CEDEX (2012)
SM-1-(3)	G. TARIFA	6962-II	98	Calcareo	26.2	1.20				38															CEDEX (2012)
SM-1-(3)	G. TARIFA	6962-III	98	Calcareo	26.2	0.60				37															CEDEX (2012)
SM-1-(3)	G. TARIFA	6962-IV	98	Calcareo	26.2	1.30				43															CEDEX (2012)

Sondeo	Zona	Muestra	Prof. (m)	Grupo	$\gamma_{se}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	$\rho_{se}$ (kg/m <sup>3</sup> )	LL	IP	RCS (MPa)	$I_{so}$ (MPa)	RTI (MPa)	E (MPa)	v	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Edin (MPa)	E <sub>s</sub> MPa	E <sub>s</sub> MPa	Hinch. (%)	P. Hinch (kPa)	ID2 (%)	Lugom	Prem. Lefranc (m/s)	Referencia
SM-1-(3)	G. TARFA	6962 V	98	Calcareo	26.1	1.20			40.3						6500	2080	25239								CEDEX (2012)
	G. TARFA	6962-VI	98	Calcareo	26.0	0.6			33.7						5945	1730	20671								CEDEX (2012)
	G. TARFA	6962-VII	98	Calcareo	25.8	1.8			22.5						5531	1609	17812								CEDEX (2012)
	S-5		393	Calcareo																					SECEG (1983b)
SB-1		76	76	Calcareo	26.6				56		2.6				3476	2393	16820								LPEE (1993)
	SB-3	20	20	Calcareo	23.7				22.8						2854	2243	6312								LPEE (1993)
	SB-3	30	30	Calcareo	22.1				22						2525	1548	7926								LPEE (1993)
	SB-10	11	11	Calcareo	23.3				31.7				7.4		2143	1500	5454								LPEE (1993)
G-TARIFA		M-66 (1)		Calcareo	26.8	0.11						9.1													Geocontrol, 1995a
	G-TARIFA	M-66(2)		Calcareo	26.7	0.11						10													Geocontrol, 1995a
SB-5			69	Calcareo							2.2														SECEG (1983b)
	SB-5		220	Calcareo	25.7					93.2															LPEE (1993)
	SB-10		26	Calcareo	28.5										3067	1804	14989								LPEE (1993)
	S-5		240	Detritico																		98.1			CEDEX (1984)
Geo.5			261	Detritico																					CEDEX (1984)
	Geo.5		54	Detritico	24.1					23.2					3342	2080	15124								LPEE (1982)
	Geo.5		54	Detritico	23.8					29.1					3060	2100	11690								LPEE (1982)
	Geo.5		70	Detritico	25.3					16.6					3530	2080	17636								LPEE (1982)
Geo.5			73	Detritico	23.4										2600	1880	7515								LPEE (1982)
	S-5		27	Detritico																		94.4			CEDEX (1984)
	S-5		57	Detritico		0.9				37.8															CEDEX (1984)
	S-5		27	Detritico						49.8															CEDEX (1984)
S-5		57	Detritico	1					42.6																CEDEX (1984)
S-5		217	Detritico			1.3																			CEDEX (1984)
G. TARFA		M-5		Detritico	23.7	2.26						2.8													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-5 (1)		Detritico	24.3	2.32			25.1				7077	0.24											Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-6 (1)		Detritico	24.8	1.55			36.4			3.2	9650	0.29											Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-6 (2)		Detritico	24.2	1.55						4.7													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-6 (3)		Detritico	24.2	1.3						5.1													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-7		Detritico	24.6	1.2						4.5													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-15B		Detritico	25.5	1.44						2.3	23612	0.16											Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-23B		Detritico	26.2	1.63			35.1				9501	0.25											Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-24A		Detritico	26.1	1.35			31.2				6885	0.27											Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-24A (2)		Detritico	26.2	1.5							5.7												Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-24B		Detritico	26.6	1.62							6.7												Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-24A (2)		Detritico	26.2	1.5							5.7												Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-38 (2)		Detritico	24.7	5.06							6.7												Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-41 (3)		Detritico	23.8	3.63							1.1	2181	0.45										Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-41 (1)		Detritico	25.1	4.14							1.1	2355	0.05										Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-41 (2)		Detritico	23.8	3.63							1												Geocontrol, 1995a
G. TARFA	M-42		Detritico	26.3	5.72							1.3	5725	0.30										Geocontrol, 1995a	
G. TARFA		M-47 (1)		Detritico	24.1	3.5						1.3													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-47 (2)		Detritico	24.4	2.36						1.1													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-47 (4)		Detritico	25.0	1.82						1.8													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-47 (5)		Detritico	24.1	2.61						1.4													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-47 (6)		Detritico	23.9	3.05						1													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-47 (3)		Detritico	24.0	4.28						1													Geocontrol, 1995a
S-5			56	Detritico							3.5														SECEG (1983b)
	S-5		58	Detritico							3.3														SECEG (1983b)
	S-5		60	Detritico							3.7														SECEG (1983b)
	S-5		125	Detritico							1.6														SECEG (1983b)
S-5			155	Detritico						5.0															SECEG (1983b)
	S-5		159	Detritico						4.8															SECEG (1983b)
	S-5		162	Detritico						3.1															SECEG (1983b)
	S-5		162	Detritico							1.6														SECEG (1983b)
S-5			163	Detritico						1.8															SECEG (1983b)
	S-5		211	Detritico						211															SECEG (1983b)
	SB-5		188	Detritico	23.4					14.5					2600	1565	8888								LPEE (1993)
	S-5		157	Detritico																		98.2			CEDEX (1984)
S-5			335	Detritico																					CEDEX (1984)
	S-5		365	Detritico																					CEDEX (1984)
	S-5		376	Detritico																					CEDEX (1984)
	S-5		387	Detritico								3.9													CEDEX (1984)
S-5			399	Detritico																					CEDEX (1984)
	S-5			Detritico																					CEDEX (1984)
	S-5		376	Detritico	1.5					31.5															CEDEX (1984)
	S-5		376	Detritico	1.8					6.8															CEDEX (1984)
S-5			240	Detritico																					CEDEX (1984)
	S-5		240	Detritico																					CEDEX (1984)
	SB-5		97.35	Detritico																					UNIOVI (1987)
	S-5			Detritico	23.4																				UNIOVI (1987)
G. TARFA		M-3 (1)		Detritico	24.1	4.37			23.9				5613	0.14											Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-4		Detritico	24.2	3.55			17.6				8392	0.11											Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-4 (1)		Detritico	23.8	3.55						1.8													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-14A (1)		Detritico	24.0	1.28							1.9												Geocontrol, 1995a
G. TARFA		M-16B (1)		Detritico	26.1	1.55																			Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-19A (1)		Detritico	25.9	2.04																			Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-19B (1)		Detritico	25.6	3.4																			Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-19B (1)		Detritico	25.6	3.4																			Geocontrol, 1995a

Sondeo	Zona	Muestra	Prof. (m)	Grupo	$\gamma_{se}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega$ (%)	$\rho_{se}$ (kg/m <sup>3</sup> )	LL	IP	RCS (MPa)	$I_{so}$ (MPa)	RTI (MPa)	E (MPa)	v	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Edin (MPa)	E <sub>s</sub> MPa	E <sub>s</sub> MPa	Hinch. (%)	P. Hinch. (kPa)	ID2 (%)	Lugom	Prem. Leifranc (m/s)	Referencia
				Detritico	25.4	2.23						4	22328	0.20											Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-20A (1)		Detritico	25.9	2.15						4.9													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-20B (3)		Detritico	25.7	0.67						4.3													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-21 (2)		Detritico	25.6	0.99						3.8													Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-22 (2)		Detritico	26.2	3.8																			Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-23C		Detritico	25.6	2.31				29			224	0.24											Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-26A		Detritico	25.6	3.36							8958	0.49											Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-31 (4)		Detritico	25.7	3.3							7733	0.27											Geocontrol, 1995a
	G. TARFA	M-32 (2)		Detritico	25.7	3.28						1	7691	0.25											Geocontrol, 1995a
S-5			275	Detritico							2.4														SECEG (1983b)
S-5			295	Detritico							0.9														SECEG (1983b)
S-5			300	Detritico							1.9														SECEG (1983b)
S-5			325	Detritico							4.9														SECEG (1983b)
S-5			361	Detritico							1.1														SECEG (1983b)
S-5			364	Detritico							2.4														SECEG (1983b)
S-5			371	Detritico							3.7														SECEG (1983b)
S-5			376	Detritico							5.2														SECEG (1983b)
S-5			379	Detritico							4.2														SECEG (1983b)
S-5			384	Detritico							3.1														SECEG (1983b)
S-5			397	Detritico							1.3														SECEG (1983b)
S-5			269	Detritico							1.5														SECEG (1983b)
Geo.5			104	Sin dato																	250				SNED (1984)
SB-1			28	Sin dato																			0.3		CMS (1992)
SB-1			49	Sin dato																			0.3		CMS (1992)
SB-1			72	Sin dato																			0		CMS (1992)
SB-1			100	Sin dato																			0		CMS (1992)
SB-2			23.5	Sin dato																			0		CMS (1992)
SB-2			64	Sin dato																			6.4		CMS (1992)
SB-2			100	Sin dato																			0.6		CMS (1992)
SB-2			125	Sin dato																			0.7		CMS (1992)
SB-3			25	Sin dato																			2.4		CMS (1992)
SB-3			72	Sin dato																			0.5		CMS (1992)
SB-3			124	Sin dato																			1.4		CMS (1992)
SB-3			145	Sin dato																			0.8		CMS (1992)
SB-4			39	Sin dato																			0.3		CMS (1992)
SB-4			91	Sin dato																			1.1		CMS (1992)
SB-4			113	Sin dato																			0.8		CMS (1992)
SB-4			150	Sin dato																			0.3		CMS (1992)
SB-5			24	Sin dato																			1.5		CMS (1992)
SB-5			76	Sin dato																			2.3		CMS (1992)
SB-5			148	Sin dato																			0.5		CMS (1992)
SB-5			173	Sin dato																			0.9		CMS (1992)
SB-5			194	Sin dato																			0.3		CMS (1992)
SB-6			37	Sin dato																			8		CMS (1992)
SB-6			52.5	Sin dato																			2.5		CMS (1992)
SB-6			81	Sin dato																			5		CMS (1992)
SB-6			124	Sin dato																			0		CMS (1992)
SB-7			23	Sin dato																			0.2		CMS (1992)
SB-7			69	Sin dato																			0.4		CMS (1992)
SB-7			100	Sin dato																			0.4		CMS (1992)
SB-7			23	Sin dato																			21		CMS (1992)
SB-8			7	Sin dato																			4		CMS (1992)
SB-8			11	Sin dato																			100		CMS (1992)
SB-8			16	Sin dato																			2		CMS (1992)
SB-8			22	Sin dato																			1		CMS (1992)
SB-8			31	Sin dato																			1		CMS (1992)
SB-8			37	Sin dato																			0		CMS (1992)
SB-8			41	Sin dato																			1		CMS (1992)
SB-8			46	Sin dato																			100		CMS (1992)
SB-9			8.5	Sin dato																			100		CMS (1992)
SB-9			12	Sin dato																			0		CMS (1992)
SB-9			20	Sin dato																			10		CMS (1992)
SB-9			25	Sin dato																			20		CMS (1992)
SB-10			12	Sin dato																			0		CMS (1992)
SB-10			30	Sin dato																			0		CMS (1992)
SB-10			38.5	Sin dato																			0		CMS (1992)
SB-1			15	Sin dato																			0		CMS (1992)
SB-2			39.5	Sin dato																			0		CMS (1992)
SB-2			85	Sin dato																			1.00E-12		CMS (1992)
SB-3			45	Sin dato																			1.00E-12		CMS (1992)
SB-3			100	Sin dato																			2.3		CMS (1992)
SB-3			15.5	Sin dato																			1.00E-07		CMS (1992)
SB-4			65	Sin dato																			2.00E-07		CMS (1992)
SB-4			54	Sin dato																			1.00E-08		CMS (1992)
SB-4			100	Sin dato																			2.00E-12		CMS (1992)
SB-6			53.5	Sin dato																			2.00E-08		CMS (1992)

Sondeo	Zona	Muestra	Prof. (m)	Grupo	$\gamma_{se}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (%)	$\rho_{se}$ (kg/m <sup>3</sup> )	LL	IP	RCS (MPa)	$I_{so}$ (MPa)	RTI (MPa)	E (MPa)	v	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Edin (MPa)	E <sub>s</sub> MPa	E <sub>s</sub> MPa	Hinch. (%)	P. Hinch. (kPa)	ID2 (%)	Lugeon	Prem. Leirrac. (m/s)	Referencia
SB-6			100	Sin dato																				1,00E-12	CMS (1992)
	G. TARFA		58.4	Sin dato														3500							García González, 1996
	G. TARFA		58.9	Sin dato														5570							García González, 1996
	G. TARFA		46.1	Sin dato														195							García González, 1996
	G. TARFA		46.1	Sin dato														265							García González, 1996
	G. TARFA		46.8	Sin dato														351							García González, 1996
	G. TARFA		46	Sin dato														454							García González, 1996
	G. TARFA		46	Sin dato														333							García González, 1996
	G. TARFA		46.8	Sin dato														1980							García González, 1996
	G. TARFA		92.5	Sin dato														5560							García González, 1996
	G. TARFA		92.6	Sin dato														1124							García González, 1996
Pozo	MALABATA	120	120	Sin dato														1499							LPEE (1994,1995)
Gali. E 7.5	MALABATA	147	147	Sin dato														6371							LPEE (1994,1995)
Gali. E 28.5	MALABATA	147	147	Sin dato														6371							LPEE (1994,1995)
Gali. E 49	MALABATA	147	147	Sin dato														344							LPEE (1994,1995)
Gali. E 60	MALABATA	147	147	Sin dato														1205							LPEE (1994,1995)
Gali. Principal	MALABATA	147	147	Sin dato														282							LPEE (1994,1995)
Pozo	MALABATA	210	210	Sin dato														2429							LPEE (1994,1995)
Gali. NE 10.10	MALABATA	300	300	Sin dato														1369							LPEE (1994,1995)
Gali. 35.6	MALABATA	300	300	Sin dato														273							LPEE (1994,1995)
Pozo	MALABATA	76	76	Sin dato														208							LPEE (1994,1995)
Pozo	MALABATA	120	120	Sin dato														1678							LPEE (1994,1995)
Gali. E 7.5	MALABATA	147	147	Sin dato														2101							LPEE (1994,1995)
Gali. E 28.5	MALABATA	147	147	Sin dato														2101							LPEE (1994,1995)
Gali. W 7.5	MALABATA	147	147	Sin dato														95							LPEE (1994,1995)
Gali. E 60	MALABATA	147	147	Sin dato														184							LPEE (1994,1995)
Gali. Principal	MALABATA	147	147	Sin dato														524							LPEE (1994,1995)
Pozo	MALABATA	210	210	Sin dato														5436							LPEE (1994,1995)
Gali. NE 10.10	MALABATA	300	300	Sin dato														828							LPEE (1994,1995)
Gali. 35.6	MALABATA	300	300	Sin dato														367							LPEE (1994,1995)

Tabla II - 2. Datos de la Unidad de Bolonia empleados en el estudio estadístico

Sondeo	Muestra	Grupo	Prof. (m)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho$ insitu kg/m <sup>3</sup>	I.P.	RCS (MPa)	Is <sub>60</sub> (MPa)	Placa (MPa)	Lambe (kPa)	ID2 (%)	Referencias
S-1		Argilita	276			33				265		CEDEX (1983a, 1984)
S-1		Argilita	285			35				226		CEDEX (1983a, 1984)
S-1		Argilita	285			34						CEDEX (1983a, 1984)
S-1		Argilita	298			34				371		CEDEX (1983a, 1984)
S-1		Argilita	301			31				319		CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Argilita	45	14,7		47,6				159		CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Argilita	56	16,4		28,2				86	9,3	CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Argilita	58			28,6						CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Argilita	66	17,5		20,8				48	61,2	CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Argilita	75	15,2		55,9				124	0,6	CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Argilita	84			25,4					7,7	CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Argilita	84			26						CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Argilita	94	16,8		24,4				105	5,4	CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Argilita	94			26,3						CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Argilita	104			20,1						CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Argilita	104									CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Argilita	124								3,4	CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	24									CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	35			47,9						CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	44			52,4						CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	55			65,1						CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	65			42,2						CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	74			57,4						CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	84			49,4						CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	135			53,2						CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	155			26,6						CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	167			43,5						CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	181			31,2						CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	191			55,2						CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	65				85,9	*5,7				CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	84				94,6					CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	105				51,1	0,85				CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	125					*3,41				CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	135					0,97				CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Argilita	145					1,29				CEDEX (1983a, 1984)
S-1		Argilita	277				84,8					Uniovi (1987)
S-1		Argilita	289				122,3					Uniovi (1987)
S-2		Argilita	82				84,4					Uniovi (1987)
Z-VI	1	Argilita	5,5	18,4		20,8				1720		Cedex (1987)
Z-VI	1	Argilita	5,5	18,2								Cedex (1987)
Z-VI	1	Argilita	5,5	17,8								Cedex (1987)
Z-VI	1	Argilita	5,5	18,2								Cedex (1987)
Z-VI	2	Argilita	5,5	17,7		22,3				1100		Cedex (1987)
Z-VI	2	Argilita	5,5	17,9								Cedex (1987)
Z-VI	2	Argilita	5,5	18,1								Cedex (1987)
Z-VI	2	Argilita	5,5	17,8								Cedex (1987)
Z-VI	3	Argilita	5,5	17,6		24,7				1640		Cedex (1987)
Z-VI	3	Argilita	5,5	17,5								Cedex (1987)
Z-VI	3	Argilita	5,5	17,7								Cedex (1987)
Z-VI	3	Argilita	5,5	18,2								Cedex (1987)
Z-VI	6	Argilita	5,5	18,4		26				1900		Cedex (1987)
Z-VI	6	Argilita	5,5	18,5								Cedex (1987)
Z-VI	6	Argilita	5,5	18								Cedex (1987)
Z-VI	6	Argilita	5,5	18,8								Cedex (1987)
S-3		Argilita	29,11 – 44,10									SECEG (1983b)
S-3		Argilita	58,25 – 76,96									SECEG (1983b)
Z-VI	D-1	Argilita	5,5		1600							CEDEX (1987a)
Z-VI	D-2	Argilita	5,5		1650							CEDEX (1987a)
Z-VI	D-3	Argilita	5,5		1570							CEDEX (1987a)
Z-VI	D-4	Argilita	5,5		1600							CEDEX (1987a)
Z-VI	D-5	Argilita	5,5		1660							CEDEX (1987a)
Z-VI	D-6	Argilita	5,5		1600							CEDEX (1987a)
Z-VI		Argilita	5,5									CEDEX (1987a)
Z-VI		Argilita	5,5						22			CEDEX (1987a)
Z-VI		Argilita	5,5						18			CEDEX (1987a)
Z-VI		Argilita	5,5						15			CEDEX (1987a)
Z-VI		Argilita	5,5						25			CEDEX (1987a)
Z-VI		Argilita	5,5						14			CEDEX (1987a)
Z-VI		Argilita	5,5						89			CEDEX (1987a)
S-1		Argilita	278					0,417				SECEG (1983b)
S-1		Argilita	283					0,25				SECEG (1983b)
S-1		Argilita	284									SECEG (1983b)
S-1		Argilita	289					0,253				SECEG (1983b)
S-1		Argilita	290					*1,775				SECEG (1983b)
S-1		Argilita	296					1,415				SECEG (1983b)
S-1		Argilita	300					0,587				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	25					0,2				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	32					0,0267				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	34					0,173				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	45					*0,04				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	47					0,16				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	52					*0,05				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	58					*0,08				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	72					0,267				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	81					*0,026				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	85					0,467				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	94					*0,066				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	100					0,921				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	111					0,19				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	128					*2,723				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	137					*3,751				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	138					1,335				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	140					1,628				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	151					*0,04				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	163					*0,066				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	172					0,76				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	189					*1,842				SECEG (1983b)
S-3		Argilita	193					1,081				SECEG (1983b)
S-2		Calcarenita	51					*5,458				SECEG (1983b)
S-2		Calcarenita	69					2,315				SECEG (1983b)
S-2		Calcarenita	123					2,202				SECEG (1983b)
S-2		Calcarenita	127					1,895				SECEG (1983b)
S-3		Calcarenita	48					2,17				SECEG (1983b)

Sondeo	Muestra	Grupo	Prof. (m)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho$ insitu kg/m <sup>3</sup>	I.P.	RCS (MPa)	Is <sub>50</sub> (MPa)	Placa (MPa)	Lambe (kPa)	ID2 (%)	Referencias
S-3		Calcarenita	62					*0,08				SECEG (1983b)
S-3		Calcarenita	69					*4,085				SECEG (1983b)
S-3		Calcarenita	109					1,628				SECEG (1983b)
S-3		Calcarenita	115					*5,273				SECEG (1983b)
S-3		Calcarenita	117					*0,108				SECEG (1983b)
S-3		Calcarenita	121					*0,133				SECEG (1983b)
S-3		Calcarenita	143					2,309				SECEG (1983b)
S-3		Calcarenita	145					3,297				SECEG (1983b)
S-1		Caliza	293					2,816				SECEG (1983b)
S-1		Caliza	302					0,333				SECEG (1983b)
S-3		Caliza	89					*0,133				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	135			18,5						CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Limolita	144			23,7						CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Limolita	135				13,7					CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Limolita	144				22,5					CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Limolita	164				22					CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Limolita	175				21,2					CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Limolita	175				18,6					CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Limolita	194				18,2					CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Limolita	205				26,8					CEDEX (1983a, 1984)
S-2		Limolita	224				36,4					CEDEX (1983a, 1984)
S-3		Limolita	132				71,8					Uniovi (1987)
S-3		Limolita	138				87,9					Uniovi (1987)
S-3		Limolita	169				124,9					Uniovi (1987)
Z-V	1	Limolita	5,5	21,3		16,5				840		Cedex (1987)
Z-V	1	Limolita	5,5	21,5								Cedex (1987)
Z-V	3	Limolita	5,5	21,9		16,4				690		Cedex (1987)
Z-V	3	Limolita	5,5	21,7								Cedex (1987)
Z-V	4	Limolita	5,5	19		20,4				1050		Cedex (1987)
Z-V	4	Limolita	5,5	19,5								Cedex (1987)
Z-V	4	Limolita	5,5	19,7								Cedex (1987)
Z-V	4	Limolita	5,5	20,1								Cedex (1987)
Z-V	5	Limolita	5,5	19,1		16,3				900		Cedex (1987)
Z-V	5	Limolita	5,5									Cedex (1987)
Z-V	D-1	Limolita	5,5		1460							CEDEX (1987a)
Z-V	D-2	Limolita	5,5		1620							CEDEX (1987a)
Z-V	D-3	Limolita	5,5		1450							CEDEX (1987a)
Z-V	D-4	Limolita	5,5		1520							CEDEX (1987a)
Z-V	D-5	Limolita	5,5		1710							CEDEX (1987a)
Z-V	D-6	Limolita	5,5		1450							CEDEX (1987a)
Z-V		Limolita	5,5									CEDEX (1987a)
Z-V		Limolita	5,5						458			CEDEX (1987a)
Z-V		Limolita	5,5						358			CEDEX (1987a)
Z-V		Limolita	5,5						281			CEDEX (1987a)
Z-V		Limolita	5,5						643			CEDEX (1987a)
Z-V		Limolita	5,5						492			CEDEX (1987a)
Z-V		Limolita	5,5						375			CEDEX (1987a)
S-2		Limolita	81					0,801				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	83					0,427				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	93					1,228				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	96					0,32				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	98					1,602				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	105					1,57				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	112					0,32				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	141					1,388				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	141					0,44				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	145					*2,83				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	152					1,201				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	169					0,76				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	164					*0,253				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	171					0,574				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	177					1,708				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	182					1,455				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	186					0,258				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	192					*0,066				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	197					0,69				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	203					0,881				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	210					0,76				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	215					0,814				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	219					0,253				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	223					0,253				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	96					*3,804				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	105					1,068				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	164					*4,272				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	192					1,441				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	219					1,201				SECEG (1983b)
S-2		Limolita	223					2,202				SECEG (1983b)
S-3		Limolita	77					0,841				SECEG (1983b)
S-3		Limolita	103					1,842				SECEG (1983b)
S-3		Limolita	105					*0,213				SECEG (1983b)
S-3		Limolita	126					0,654				SECEG (1983b)
S-3		Limolita	133					2,042				SECEG (1983b)
S-2			38,25 – 230,00									SECEG (1983B)



Tabla II - 3. Datos de la Unidad de Facinas empleados en el estudio estadístico

Sondeo	Prof. (m)	$\omega$ (%)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	L.L.	L.P.	I.P.	Granulometría (%)		Cv	Cs	P <sub>t</sub>		c' (kPa)	$\phi'$ (°)	Cu (kPa)	$\phi_u$ (°)	Ep MPa	Referencia
								>2 mm	<0,08 mm			(MPa)	(kPa)						
Geo.6	43				75	27	48	4	95	0,63	0,236	0,57	570						LPÉE (1987)
Geo.6	44	7	20,5	19,2	65	21	44	0	98	0,22	0,208	0,65	650						LPÉE (1987)
Geo.6	50	6	21,1	19,9	72	28	44	1	95	0,585	0,162	0,65	650						LPÉE (1987)
Geo.6	64	6	21,3	20,2	52	23	29	12	77	0,212	0,126	0,45	450						LPÉE (1987)
Geo.6	74				53	23	30	4	91										LPÉE (1987)
Geo.6	97				63	20	43	5	92										LPÉE (1987)
Geo.6	105				62	28	34	0	99										LPÉE (1987)
Geo.6	114							2	96					60	19	70	8		LPÉE (1987)
Geo.6	129				53	24	29	0	100										LPÉE (1987)
Geo.6	147	5	20,8	19,8	48	23	25	2	91	0,165	0,07	0,8	800						LPÉE (1987)
Geo.6	170				57	24	33	7	84										LPÉE (1987)
Geo.6	175				50	23	27	15	73										LPÉE (1987)
Battouta S-6	9,5			17,9			38									75	6,5		SNED (1983)
Battouta P-5	6,8			17,2			17									10	18,5		SNED (1983)
Battouta S-6	15			16,4			47									25	3,8		SNED (1983)
Battouta S-7	9			18,5			33									40	9,5		SNED (1983)
Battouta S-7	15			18,5			40												SNED (1983)
Battouta S-8	12			17,9			33									75	11,3		SNED (1983)
Battouta S-8	13,5			17,6			34									65	13,25		SNED (1983)
Battouta P-3	7,2			19,8			16							20	15				SNED (1983)
Battouta P-5	6,8			17,2			17							16	18				SNED (1983)
Battouta P-6	5			17,2			17							20	20,5				SNED (1983)
Battouta PR-2	6,5																	18,5	SNED (1984b)
Battouta PR-2	8																	17,5	SNED (1984b)
Battouta PR-2	10																	15	SNED (1984b)
Battouta PR-2	14																	17	SNED (1984b)
Battouta PR-2	20																	23	SNED (1984b)
Battouta PR-2	23,5																	58	SNED (1984b)
Battouta PR-2	26																	72	SNED (1984b)
Battouta PR-2	28																	93	SNED (1984b)
Battouta PR-2	35,5																	120	SNED (1984b)
Battouta PR-2	39,5																	130	SNED (1984b)
Battouta PR-2	45																	160	SNED (1984b)
Battouta PR-2	48,5																	153	SNED (1984b)
Battouta PR-4	1,5																	6,2	SNED (1984b)
Battouta PR-4	3																	24	SNED (1984b)
Battouta PR-4	4,5																	10,5	SNED (1984b)
Battouta PR-4	6																	11	SNED (1984b)
Battouta PR-4	7,5																	3,5	SNED (1984b)
Battouta PR-4	9																	1,1	SNED (1984b)
Battouta PR-4	10,5																	9,7	SNED (1984b)
Battouta PR-4	12																	7,5	SNED (1984b)
Battouta PR-4	13,5																	21	SNED (1984b)
Battouta PR-4	18																	24	SNED (1984b)
Battouta PR-4	21																	40	SNED (1984b)
Battouta PR-4	25																	90	SNED (1984b)
Battouta PR-6	5,5																	10,3	SNED (1984b)
Battouta PR-6	7																	20,2	SNED (1984b)
Battouta PR-6	8,5																	20,9	SNED (1984b)
Battouta PR-6	10																	10,1	SNED (1984b)
Battouta PR-6	12																	30,3	SNED (1984b)
Battouta PR-6	12,5																	10,7	SNED (1984b)
Battouta PR-6	13,5																	10,1	SNED (1984b)
Battouta PR-6	20																	30	SNED (1984b)
Battouta PR-6	25,5																	100	SNED (1984b)
Battouta PR-6	30																	100	SNED (1984b)
Battouta PR-6A	9																	20	SNED (1984b)
Battouta PR-6A	16,5																	98	SNED (1984b)
Battouta PR-6A	19,5																	60	SNED (1984b)
Battouta PR-6A	23																	100	SNED (1984b)
Battouta PR-6A	29,5																	99	SNED (1984b)
Battouta PR-7	2,58																	10,1	SNED (1984b)
Battouta PR-7	4,5																	10,1	SNED (1984b)
Battouta PR-7	6,5																	20	SNED (1984b)
Battouta PR-7	7,5																	20	SNED (1984b)
Battouta PR-7	8																	36	SNED (1984b)
Battouta PR-7	9,5																	32	SNED (1984b)
Battouta PR-7	11																	30	SNED (1984b)
Battouta PR-7	11,25																	70	SNED (1984b)
Battouta PR-7	11,75																	42	SNED (1984b)
Battouta PR-7	13,5																	35	SNED (1984b)
Battouta PR-7	15																	43	SNED (1984b)
Battouta PR-7	18																	38	SNED (1984b)
Battouta PR-7	21,5																	110	SNED (1984b)
Battouta PR-7	24,5																	43	SNED (1984b)

Tabla II - 4. Datos de la Unidad de Almacén empleados en el estudio estadístico

SONDEO	Zona	Muestra	Prof. (m)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	e	Finos <0.06	I.P.	Cls	Slos (%)	m.o. (%)	RCS (MPa)	Is <sub>90</sub> (MPa)	Cu (kPa)	E (MPa)	E <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>s</sub> (MPa)	H. Libre. (%)	Lambe (KPa)	P. Hch (KPa)	k (m/s)	Referencias
	S-1	82	82			15.5				51.8	7.2	0.128									121			CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	91	91			16.9				42.3	10.7	0.102									134			CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	101	101			15.8				44.1	10.2	0.092									100			CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	110	110			16.8				61.0	3.1	0.06									172			CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	120	120							103	1.5	0.062												CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	139	139			14.8				77											125			CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	153	153			14.1				60.3	3.9	0.112									194			CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	164	164			15.4				49.6	18.1	0.09									145			CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	174	174							118	6.4													CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	184	184							68.3	2.8													CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	194	194			15.3				54.2	6.8										89			CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	204	204			15.4				34.6	5.4	0.126									156			CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	214	214			14.8				78	4.4	0									113			CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	235	235							49	4.6													CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	249	249							65	3.5													CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	265	265							48	4.2													CEDEX (1983a, 1984)
	S-2	14	14							25.7	2.8													CEDEX (1983a, 1984)
	S-2	25	25							54.1		0												CEDEX (1983a, 1984)
	S-3	201	201							35.8	0													CEDEX (1983a, 1984)
	S-3	219	219							58.5	0.6													CEDEX (1983a, 1984)
	S-3	229	229							57.1	1.6													CEDEX (1983a, 1984)
	S-4	10	10							51.8	3.3													CEDEX (1983a, 1984)
	S-4	19	19							25.3	0.7													CEDEX (1983a, 1984)
	S-4	29	29			16.5				27.2	0.9										86			CEDEX (1983a, 1984)
	S-4	40	40			16.6				32.4	0.8										126			CEDEX (1983a, 1984)
	S-4	50	50			16.6				26.8	0										70			CEDEX (1983a, 1984)
	S-4	59	59			16.7				26.1	1.3										97			CEDEX (1983a, 1984)
	S-4	70	70			17.3				24	0										121			CEDEX (1983a, 1984)
	S-4	80	80			16.0				28.1	0.7										90			CEDEX (1983a, 1984)
	S-4	90	90			17.5				31.9	1.8										94			CEDEX (1983a, 1984)
	S-4	100	100							38.4	2.9													CEDEX (1983a, 1984)
	S-4	13	13							47	7.4										291			CEDEX (1983a, 1984)
	S-7	23	23							47	7.3										202			CEDEX (1983a, 1984)
	S-7	33	33							50	0.4										189			CEDEX (1983a, 1984)
	S-7	44	44							52	3										205			CEDEX (1983a, 1984)
	S-7	54	54							45	8.1										55			CEDEX (1983a, 1984)
	S-7	64	64							46	1.2										127			CEDEX (1983a, 1984)
	S-7	75	75							68	2.7										99			CEDEX (1983a, 1984)
	S-7	84	84							50	5										153			CEDEX (1983a, 1984)
	S-7	95	95							65	2.7										176			CEDEX (1983a, 1984)
	S-7	105	105							48	9.3										64			CEDEX (1983a, 1984)
	S-7	115	115							33	6.1													CEDEX (1983a, 1984)
	S-7	125	125							46	8.7										78			CEDEX (1983a, 1984)
	S-7	135	135							22	1.8										132			CEDEX (1983a, 1984)
	S-7	146	146							74	16.7										68			CEDEX (1983a, 1984)
	S-7	28	28							52	8.6													CEDEX (1983a, 1984)
	S-7	28	28							8											39			CEDEX (1983a, 1984)
	S-9	10	10							22		0.09												CEDEX (1983a, 1984)
	S-9	20	20							33		0.06									238			CEDEX (1983a, 1984)
	S-9	30	30							62		0.06									342			CEDEX (1983a, 1984)
	S-9	40	40							72		0.04									265			CEDEX (1983a, 1984)
	S-9	51	51							52		0.08									293			CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	82	82																		319			CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	91	91																					CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	101	101																					CEDEX (1983a, 1984)
	S-1	110	110																					CEDEX (1983a, 1984)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							CEDEX (1986)
	S-7																							

SONDEO	Zona	Muestra	Prof. (m)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	e	Finos <0,06	LP	Q <sub>ts</sub> (%)	Stos (%)	m.o. (%)	RCS (MPa)	Is <sub>50</sub> (MPa)	C <sub>u</sub> (KPa)	E (MPa)	E <sub>50</sub> (MPa)	E <sub>p</sub> (MPa)	H <sub>Libre</sub> (%)	Lam <sub>be</sub> (KPa)	P <sub>Hinch</sub> (KPa)	k (m/s)	Referencias	
		Z-II	8	5,8						22,9	No	0,16													CEDEX (1986)
		Z-III	1	3,5						33,2	4,8	0,26	0,6												CEDEX (1986)
		Z-III	2	3,5						25,6															CEDEX (1986)
		Z-III	3	3,5						17,7	4,1														CEDEX (1986)
		Z-III	4	3,5						18,1	4,9		0,7												CEDEX (1986)
		Z-III	5	3,5						19,8	4,1	0,2													CEDEX (1986)
		Z-III	6	3,5																					CEDEX (1986)
		Z-III	7	3,5						27,5	No														CEDEX (1986)
		Z-IV	3	4						23,3															CEDEX (1986)
		Z-IV	4	4						23,7															CEDEX (1986)
		Z-IV	5	4																					CEDEX (1986)
		Z-IV	6	4						25,7	0,1	0,09													CEDEX (1986)
		Z-IV	7	4						27,4	0,1														CEDEX (1986)
		Z-IV	8	4						26	0,1														CEDEX (1986)
		Z-I	1	5												180					4,58	180			CEDEX (1986)
		Z-I	2	5												130					6,25	300			CEDEX (1986)
		Z-I	3	5												260					6	100			CEDEX (1986)
		Z-I	4	5												180					3,83	100			CEDEX (1986)
		Z-I	5	5												420					4,58	140			CEDEX (1986)
		Z-I	6	5												200					5,17	100			CEDEX (1986)
		Z-I	8	5												160					1,5	260			CEDEX (1986)
		Z-IV	3	4												50									CEDEX (1986)
		Z-IV	4	4												160									CEDEX (1986)
		Z-IV	6	4												190									CEDEX (1986)
		Z-IV	7	4												200									CEDEX (1986)
		Z-IV	8	4																					Uniovi (1987)
S-1			106																						Uniovi (1987)
S-1			197																						Uniovi (1987)
S-1			255																						Uniovi (1987)
S-3			38																						Uniovi (1987)
S-3			210																						Uniovi (1987)
S-7			32																						Uniovi (1987)
S-7			59																						Uniovi (1987)
S-7			99																						Uniovi (1987)
S-7			111																						Uniovi (1987)
S-7			130																						Uniovi (1987)
S-7			141																						Uniovi (1987)
	Bolonia		36,4			17,5				63												90			Geocisa (1993)
	Bolonia		39			16,7				44,6												100			Geocisa (1993)
	Bolonia		44,6			17,1				39												240			Geocisa (1993)
	Bolonia		36,4			*1,1																			SECEG (2001)
	Bolonia		39			17,1																			SECEG (2001)
	Bolonia		39			17,3																			SECEG (2001)
	Bolonia		39			18,6																			SECEG (2001)
	Bolonia		39			17,8																			SECEG (2001)
	Bolonia		39			17,7																			SECEG (2001)
	Bolonia		44,6			17,7																			SECEG (2001)
	Bolonia		44,6			17,5																			SECEG (2001)
	Bolonia		44,6			17,4																			SECEG (2001)
	Bolonia		44,6			17,7																			SECEG (2001)
	Bolonia		49			18,1																			SECEG (2001)
	Bolonia		49			18,0																			SECEG (2001)
	Bolonia		49			17,5																			SECEG (2001)
	Bolonia		49			17,4																			SECEG (2001)
	Bolonia		52			17,7																			SECEG (2001)
	Bolonia		52			17,7																			SECEG (2001)
	Bolonia		52			17,4																			SECEG (2001)
	Bolonia		52			17,6																			SECEG (2001)
	Bolonia		52			17,4																			SECEG (2001)
	Bolonia		52			17,2																			SECEG (2001)
	Bolonia		56			17,9																			SECEG (2001)
	Bolonia		56			17,9																			SECEG (2001)
	Bolonia		56			17,7																			SECEG (2001)
	Bolonia		56			17,8																			SECEG (2001)
	Bolonia		56			17,8																			SECEG (2001)
	Bolonia		56			17,8																			SECEG (2001)
	Bolonia		61			17,0																			SECEG (2001)

SONDEO	Zona	Muestra	Prof. (m)	$\gamma_s$ (kNm <sup>-3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kNm <sup>-3</sup> )	$\gamma_d$ (kNm <sup>-3</sup> )	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	e	Finos <0.06 (%)	Q <sub>ts</sub> (%)	Stos (%)	m.o. (%)	RCS (MPa)	Is <sub>90</sub> (MPa)	C <sub>u</sub> (KPa)	E (MPa)	E <sub>0</sub> (MPa)	E <sub>0</sub> (MPa)	H. Libre. (%)	Lam <sub>be</sub> (KPa)	P. Hinch (KPa)	k (m/s)	Referencias
	Bolonia		61			17.2																	SECEG (2001)
	Bolonia		61			17.2																	SECEG (2001)
	Bolonia		61			17.6																	SECEG (2001)
	Bolonia		61			17.5																	SECEG (2001)
	Bolonia		64			17.5																	SECEG (2001)
	Bolonia		64			17.5																	SECEG (2001)
	Bolonia		64			17.0																	SECEG (2001)
	Bolonia		64			16.9																	SECEG (2001)
	Bolonia		64			17.3																	SECEG (2001)
	Bolonia		64			17.1																	SECEG (2001)
Z-I	G. Tarifa	428	73	27.5	21.4	18.0		0.53															Geocontrol (1998)
S-1	G. Tarifa	428	73	28.7	23.3	20.4		0.41															Geocontrol (1998)
S-1	G. Tarifa	428	73	27.9	22.4	19.3		0.44															Geocontrol (1998)
S-1	G. Tarifa	428	73	28.7	22.5	19.2		0.49															Geocontrol (1998)
S-1	G. Tarifa	428	73	27.5	21.2	17.7		0.56															Geocontrol (1998)
S-1	G. Tarifa	428	73	28.2	21.3	17.5		0.61															Geocontrol (1998)
S-1	G. Tarifa	428	73	26.9	21.9	19.0		0.41															Geocontrol (1998)
S-2	G. Tarifa	447	65	27.1	22.3	19.6		0.38															Geocontrol (1998)
S-2	G. Tarifa	447	65	27.8	22.9	20.2		0.38															Geocontrol (1998)
S-2	G. Tarifa	447	65	27.5	22.1	19.1		0.44															Geocontrol (1998)
S-2	G. Tarifa	447	65	28.3	23.2	20.5		0.38															Geocontrol (1998)
S-3	G. Tarifa	428	73	28.3	22.6	19.4		0.46															Geocontrol (1998)
S-3	G. Tarifa	428	73	28.4	22.3	19.0		0.49															Geocontrol (1998)
S-5	G. Tarifa	428	73	28.1	22.6	19.5		0.44															Geocontrol (1998)
S-5	G. Tarifa	428	73	28.0	21.6	18.0		0.56															Geocontrol (1998)
S-6	G. Tarifa	447	65	28.1	22.3	19.1		0.47															Geocontrol (1998)
S-6	G. Tarifa	447	65	27.6	23.2	20.7		0.34															Geocontrol (1998)
S-6	G. Tarifa	447	65	27.3	22.7	20.0		0.36															Geocontrol (1998)
S-6	G. Tarifa	447	65	27.8	23.8	21.5		0.29															Geocontrol (1998)
S-6	G. Tarifa	447	65	28.2	23.1	20.2		0.39															Geocontrol (1998)
S-6	G. Tarifa	447	65	27.9	23.2	20.6		0.35															Geocontrol (1998)
S-1	G. Tarifa	428	73						96.71	36	0.3												Geocontrol (1998)
S-1	G. Tarifa	428	73						81.41										12.8		165		Geocontrol (1998)
S-1	G. Tarifa	428	73						89.94	37	0.9									213			Geocontrol (1998)
S-1	G. Tarifa	428	73						91.48														Geocontrol (1998)
S-1	G. Tarifa	428	73						94.97														Geocontrol (1998)
S-2	G. Tarifa	447	65						89.3	31.5	0.36								18		125		Geocontrol (1998)
S-2	G. Tarifa	447	65						85.35														Geocontrol (1998)
S-2	G. Tarifa	447	65						91.53														Geocontrol (1998)
S-2	G. Tarifa	447	65						84.97														Geocontrol (1998)
S-2	G. Tarifa	447	65						89.95														Geocontrol (1998)
S-3	G. Tarifa	428	73						95.24	40.2	0.81								4		156		Geocontrol (1998)
S-3	G. Tarifa	447	65						86.22	28.2	0.52								8.6		120		Geocontrol (1998)
S-6	G. Tarifa	447	65																				Geocontrol (1998)
S-3	G. Tarifa	480	69	27.3	22.0	19.0		0.44															Geocontrol (1998)
S-3	G. Tarifa	480	69	28.0	24.5	22.6		0.24															Geocontrol (1998)
S-3	G. Tarifa	480	69	27.5	24.1	22.1		0.24															Geocontrol (1998)
S-4	G. Tarifa	527	71	27.4	22.6	19.8		0.38															Geocontrol (1998)
S-4	G. Tarifa	527	71	27.6	22.6	19.8		0.39															Geocontrol (1998)
S-4	G. Tarifa	527	71	27.5	23.2	20.7		0.33															Geocontrol (1998)
S-4	G. Tarifa	527	71	28.4	23.8	21.3		0.33															Geocontrol (1998)
S-7	G. Tarifa	480	69	27.4	23.5	21.3		0.29															Geocontrol (1998)
S-7	G. Tarifa	480	69	28.0	23.2	20.5		0.37															Geocontrol (1998)
S-7	G. Tarifa	480	69	26.5	22.4	19.9		0.33															Geocontrol (1998)
S-8	G. Tarifa	527	71	27.5	22.5	19.7		0.39															Geocontrol (1998)
S-8	G. Tarifa	527	71	27.1	22.6	20.0		0.36															Geocontrol (1998)
S-8	G. Tarifa	527	71	27.8	23.3	20.8		0.34															Geocontrol (1998)
S-3	G. Tarifa	480	69						76.37										2.6		20		Geocontrol (1998)
S-7	G. Tarifa	480	69						71.68														Geocontrol (1998)
S-4	G. Tarifa	527	71						75.29										0.6		7		Geocontrol (1998)
S-8	G. Tarifa	527	71						73.85														Geocontrol (1998)
S-8	G. Tarifa	527	71						62.35														Geocontrol (1998)
S-3	G. Tarifa	480	69						81.82	23.8	16.2												Geocontrol (1998)
S-4	G. Tarifa	527	71							14.9	10.4												Geocontrol (1998)
S-7	G. Tarifa	480	69							14.8	4.79								0.3		20		Geocontrol (1998)
S-8	G. Tarifa	527	71							14	3.73								0.5		32		Geocontrol (1998)
	G. Tarifa	M-79				22.0							0.370			15.2							SECEG (2001)
	G. Tarifa	M-80				22.7							0.500			22.2							SECEG (2001)
	G. Tarifa	M-81				25.0																	SECEG (2001)
	G. Tarifa	M-82				22.7							0.490			16.4							SECEG (2001)
	G. Tarifa	M-83				22.6							0.430			16.7							SECEG (2001)
	G. Tarifa	M-84				21.6							0.425			42.5							SECEG (2001)
	G. Tarifa	M-85				19.9							0.295			13.1							SECEG (2001)
	G. Tarifa	M-86				20.9							0.558			55.8							SECEG (2001)

---

400

SONDEO	Zona	Muestra	Prof. (m)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	e	Finos <0.06	I.P.	Clos (%)	Slos (%)	m.o. (%)	RCS (MPa)	Is <sub>90</sub> (MPa)	C <sub>u</sub> (KPa)	E (MPa)	E <sub>g</sub> (MPa)	E <sub>p</sub> (MPa)	H. Libre. (%)	Lambe (KPa)	P <sub>h</sub> Hinch (KPa)	k (m/s)	Referencias
S-8 S-8 S-8 S-4	G. Tarifa	527	71																				2.90E-10	SECEG (2001)
	G. Tarifa	527	71																				1.50E-10	SECEG (2001)
	G. Tarifa	527	71																				1.80E-10	SECEG (2001)
	G. Tarifa		*58-108																					SECEG (1983b)
S-9 S-9 S-9 S-9 S-9 S-7 S-7 S-7 S-7 S-7 S-7 S-9 S-10 S-7 S-7 S-11 S-11 S-12 S-12 S-8 S-8 S-13	G. Tarifa		76															91						Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		76															81						Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		75															36						Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		75															91						Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		76															82						Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		76															121						Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		76															121						Geocontrol (1988)
				35.5														244						CEDEX (1983)
				37.5														156						CEDEX (1983)
				41.7														98						CEDEX (1983)
				45.1														263						CEDEX (1983)
				46.1														90						CEDEX (1983)
			19.1														121						CEDEX (1983)	
			39.4														93						CEDEX (1983)	
			40.4														210						CEDEX (1983)	
			43.7														364						CEDEX (1983)	
			44.7														159						CEDEX (1983)	
			47.7														144						CEDEX (1983)	
	G. Tarifa		80.4														144							Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		82														239							Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		86.5														132							Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		68.8														89							Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		69.7														267							Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		71.7														77							Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		78														130							Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		76.4														602							Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		83.3														474							Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		75.2														1082							Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		76.2														2100							Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		85														2098							Geocontrol (1988)
	G. Tarifa		5				1540																	CEDEX (1985a)
	Z-I		5				1830																	CEDEX (1985a)
	Z-I		5				1700																	CEDEX (1985a)
	Z-I		5				1660																	CEDEX (1985a)
	Z-I		5				1770																	CEDEX (1985a)
	Z-I		5				1760																	CEDEX (1985a)
	Z-I		3.5				1530																	CEDEX (1985b)
	Z-III		3.5				1740																	CEDEX (1985b)
	Z-III		3.5				1530																	CEDEX (1985b)
	Z-III		3.5				1680																	CEDEX (1985b)
	Z-III		3.5				1770																	CEDEX (1985b)
	Z-III		3.5				1860																	CEDEX (1985b)
	Z-III		3.5				1840																	CEDEX (1985b)
	Z-III		3.5				1650																	CEDEX (1985b)
	Z-IV		4				1600																	CEDEX (1985b)
	Z-IV		4				1430																	CEDEX (1985b)
	Z-IV		4				1410																	CEDEX (1985b)
	Z-IV		4				1560																	CEDEX (1985b)
	Z-IV		4				1580																	CEDEX (1985b)
	Z-IV		4				1560																	CEDEX (1985b)
	Z-IV		4				1560																	CEDEX (1985b)
	Z-IV		4				1700																	CEDEX (1985b)
	Z-I		5																					CEDEX (1985a)
	Z-III		3.5																					CEDEX (1985b)
	Z-IV		4																					CEDEX (1985b)
	Z-I	NE	5																					CEDEX (1985a)
	Z-I	NE	5																					CEDEX (1985a)
	Z-I	SW	5																					CEDEX (1985a)
	Z-I	SW	5																					CEDEX (1985a)
	Z-III		3.5																					CEDEX (1985b)
	Z-III		3.5																					CEDEX (1985b)
	Z-III		3.5																					CEDEX (1985b)
	Z-III		3.5																					CEDEX (1985b)
	Z-III		3.5																					CEDEX (1985b)
	Z-III		3.5																					CEDEX (1985b)

SONDEO	Zona	Muestra	Prof. (m)	$\gamma_s$ (kNm <sup>-3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kNm <sup>-3</sup> )	$\gamma_d$ (kNm <sup>-3</sup> )	$\rho_d$ (kg/m3)	e	Finos -<0.06	I.P.	Q <sub>ts</sub> (%)	St <sub>ts</sub> (%)	m.o. (%)	RCS (MPa)	Is <sub>90</sub> (MPa)	C <sub>u</sub> (KPa)	E (MPa)	E <sub>s</sub> (MPa)	E <sub>p</sub> (MPa)	H. Libre. (%)	Lambe (KPa)	P. Hinch (KPa)	k (m/s)	Referencias
	Z-IV		4																					CEDEX (1985b)
	Z-IV		4																					CEDEX (1985b)
	Z-IV		4																					CEDEX (1985b)
	Z-IV		4																					CEDEX (1985b)
	Z-IV		4																					CEDEX (1985b)
S-1			73																					CEDEX (1985b)
S-1			82												0.03									SECEG (1983b)
S-1			83												0.60									SECEG (1983b)
S-1			98												1.11									SECEG (1983b)
S-1			105												2.32									SECEG (1983b)
S-1			118												0.07									SECEG (1983b)
S-1			121												0.16									SECEG (1983b)
S-1			126												1.10									SECEG (1983b)
S-1			138												0.05									SECEG (1983b)
S-1			161												0.83									SECEG (1983b)
S-1			167												5.07									SECEG (1983b)
S-1			183												0.11									SECEG (1983b)
S-1			200												0.09									SECEG (1983b)
S-1			201												1.82									SECEG (1983b)
S-1			203												0.12									SECEG (1983b)
S-1			209												0.03									SECEG (1983b)
S-1			268												0.44									SECEG (1983b)
S-3			200												0.03									SECEG (1983b)
S-3			207												0.20									SECEG (1983b)
S-3			212												1.01									SECEG (1983b)
S-3			230												0.04									SECEG (1983b)
S-4			7.8												0.11									SECEG (1983b)
S-4			16.7												0.19									SECEG (1983b)
S-4			27												0.11									SECEG (1983b)
S-4			32												0.11									SECEG (1983b)
S-4			32												0.11									SECEG (1983b)
S-4			38												0.11									SECEG (1983b)
S-4			40												0.09									SECEG (1983b)
S-4			42												0.22									SECEG (1983b)
S-4			47												0.11									SECEG (1983b)
S-4			52												0.05									SECEG (1983b)
S-4			56												0.11									SECEG (1983b)
S-4			58												0.20									SECEG (1983b)
S-4			62												0.35									SECEG (1983b)
S-4			70												0.11									SECEG (1983b)
S-4			77												0.09									SECEG (1983b)
S-4			78												0.05									SECEG (1983b)
S-4			97												0.19									SECEG (1983b)
S-4			102												0.03									SECEG (1983b)
S-7			11												0.03									SECEG (1983b)
S-7			16												0.12									SECEG (1983b)
S-7			19												0.03									SECEG (1983b)
S-7			30												0.03									SECEG (1983b)
S-7			37												0.16									SECEG (1983b)
S-7			45												0.08									SECEG (1983b)
S-7			53												2.18									SECEG (1983b)
S-7			56												0.11									SECEG (1983b)
S-7			62												0.03									SECEG (1983b)
S-7			74												0.05									SECEG (1983b)
S-7			84												0.03									SECEG (1983b)
S-7			92												0.03									SECEG (1983b)
S-7			107												0.03									SECEG (1983b)
S-7			110												2.92									SECEG (1983b)
S-7			114												0.99									SECEG (1983b)
S-7			117												0.33									SECEG (1983b)
S-7			125												2.46									SECEG (1983b)
S-7			127												0.03									SECEG (1983b)
S-7			130												1.25									SECEG (1983b)
S-7			135												0.05									SECEG (1983b)
S-7			142												1.67									SECEG (1983b)
S-7			148												0.15									SECEG (1983b)
S-9			32												0.80									SECEG (1983b)
S-9			41												0.13									SECEG (1983b)
S-9			44												0.11									SECEG (1983b)
S-9			53												0.19									SECEG (1983b)
S-9			55												0.19									SECEG (1983b)

Tabla II - 5. Datos de las brechas empleados en el estudio estadístico

Sondeo	Prof. (m)	Gs	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	IP	RCS (MPa)	E (MPa)	k (m/s)	Referencia
NK-2G	192		18,00			30				LPEE (1999)
NK-2G	213		17,20			20				LPEE (1999)
NK-2G	149		19,00							LPEE (1999)
NK-3E	188		18,00							LPEE (1999)
NK-3E	191		20,00			26				LPEE (1999)
NK-3E	220		22,80			18				LPEE (1999)
NK-12	147		18,00							LPEE (1999)
NK-6	197		19,50							LPEE (1999)
NK-3E	213		18,80							LPEE (1999)
NK-2G	157		19,50			21				LPEE (1999)
NK-2G	178		18,50							LPEE (1999)
NK-2G	187		17,80			26				LPEE (1999)
NK-12	96		22,20							LPEE (1999)
NK-2G	102		18,90			24				LPEE (1999)
NK-12	196		22,40							LPEE (1999)
NK-12	199		24,60							LPEE (1999)
NK-12	60		23,30							LPEE (1999)
NK-3E	165		17,20							LPEE (1999)
NK-2G	95		19,00			36				LPEE (1999)
NK-3E	153		18,80			36				LPEE (1999)
NK-12	46		22,20							LPEE (1999)
NK-3E	158		19,20							LPEE (1999)
NK-3E	173		17,90							LPEE (1999)
NK-12	91		22,90							LPEE (1999)
NK-2G	95		18,10							CEDEX (1999)
NK-2G	95		17,50							CEDEX (1999)
NK-2G	118		17,70							CEDEX (1999)
NK-2G	118		17,90							CEDEX (1999)
NK-2G	147		18,70							CEDEX (1999)
NK-2G	147		18,80							CEDEX (1999)
NK-2G	177		18,30							CEDEX (1999)
NK-2G	177		18,50							CEDEX (1999)
NK-2G	202		17,40							CEDEX (1999)
NK-2G	202		18,30							CEDEX (1999)
NK-3D	145		18,20							CEDEX (1999)
NK-3D	145		18,30							CEDEX (1999)
NK-3D	145		18,70							CEDEX (1999)
NK-3D	160		17,60							CEDEX (1999)
NK-3D	160		17,70							CEDEX (1999)
NK-3D	160		17,00							CEDEX (1999)
NK-3E	159		18,80							CEDEX (1999)
NK-3E	180		19,60							CEDEX (1999)
NK-3E	180		19,20							CEDEX (1999)
NK-3E	192		18,60							CEDEX (1999)
NK-3E	192		19,40							CEDEX (1999)
NK-3E	192		18,30							CEDEX (1999)
NK-3E	198		17,40							CEDEX (1999)
NK-3E	198		17,60							CEDEX (1999)
NK-2G	95,25	2,80				17,8	0,094			CEDEX (1999)
NK-2G	117	2,80				28,1				CEDEX (1999)
NK-2G	147,2	2,78				29,1	0,202			CEDEX (1999)
NK-2G	147,2						0,257			CEDEX (1999)
NK-2G	177	2,73				29,9				CEDEX (1999)
NK-2G	202	2,77				20,8				CEDEX (1999)
NK-3D	145,2	2,75				24,6				CEDEX (1999)
NK-3D	159,6	2,78				23,5				CEDEX (1999)
NK-3E	159	2,70				17,3				CEDEX (1999)
NK-3E	179,7	2,78				15,5				CEDEX (1999)
NK-3E	191	2,69				26,4				CEDEX (1999)
NK-3E	198	2,83				28				CEDEX (1999)
NK-2G	202							85		CEDEX (1999)
NK-2G	202							200		CEDEX (1999)
NK-3D	145							60		CEDEX (1999)
NK-3D	145							95		CEDEX (1999)
NK-3D	145							55		CEDEX (1999)
NK-3D	159							50		CEDEX (1999)
NK-3D	159							150		CEDEX (1999)
NK-3D	159							200		CEDEX (1999)
NK-3E	159							200		CEDEX (1999)
NK-3E	179							180		CEDEX (1999)
NK-3E	191							160		CEDEX (1999)
NK-3E	191							220		CEDEX (1999)
NK-3E	198							85		CEDEX (1999)
NK-3E	198							170		CEDEX (1999)
NK-3E	179,8								5,30E-11	CEDEX (1999)
NK-3E	192								7,70E-11	CEDEX (1999)
NK-3E	192								1,80E-10	CEDEX (1999)
NK-3E	192								1,60E-10	CEDEX (1999)
NK-3D	150	2,68	17,84	21,18	0,50	29,8				GEOCONTROL (1999)
NK-3D	150	2,68	17,60	21,04	0,52					GEOCONTROL (1999)
NK-3E	153	2,74	18,85	21,97	0,45					GEOCONTROL (1999)
NK-3E	168	2,71	17,92	21,31	0,51	34,8				GEOCONTROL (1999)
NK-3E	173	2,88	17,67	21,53	0,63					GEOCONTROL (1999)
NK-3E	184	2,82	18,44	21,89	0,53	23,8				GEOCONTROL (1999)
NK-3E	213	2,70	17,64	21,11	0,53					GEOCONTROL (1999)
NK-2G	52	2,77	18,25	21,66	0,52					GEOCONTROL (1999)
NK-2G	67	2,76	18,22	21,61	0,51					GEOCONTROL (1999)
NK-2G	112	2,71	18,24	21,50	0,48	24,1				GEOCONTROL (1999)
NK-2G	133	2,76	18,24	21,62	0,51					GEOCONTROL (1999)
NK-2G	149	2,81	18,67	22,02	0,50					GEOCONTROL (1999)
NK-2G	163	2,78	18,29	21,72	0,52	25,6				GEOCONTROL (1999)
NK-2G	189	2,82	18,16	21,72	0,55					GEOCONTROL (1999)
NK-2G	213	2,81	18,17	21,71	0,55					GEOCONTROL (1999)
NK-3D	150								4,50E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-3D	150								2,80E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-3D	150								1,40E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-3E	153								1,20E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-3E	153								4,60E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-3E	123								2,20E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-3E	168								8,90E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-3E	168								6,70E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-3E	168								5,50E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-3E	173								8,10E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-3E	173								4,30E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-3E	173								2,10E-10	GEOCONTROL (1999)



NK-3E	213									6,80E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-3E	213									4,20E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-3E	184									4,20E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-3E	184									3,70E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-3E	184									2,40E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	52									3,30E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	52									1,20E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	52									3,10E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	67									9,40E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	67									2,20E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	112									6,10E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	112									7,30E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	112									6,00E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	133									2,50E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	133									1,60E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	149									3,70E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	149									4,80E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	149									1,70E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	163									4,10E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	163									3,40E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	163									1,50E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	187									2,20E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	187									1,80E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	187									1,30E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	213									1,70E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	213									1,30E-10	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	213									7,70E-11	GEOCONTROL (1999)
NK-2G	52	2,77	18,25	21,66	0,52						GEOCONTROL (1999)
NK-2G	67	2,76	18,22	21,61	0,51						GEOCONTROL (1999)
NK-2G	112	2,71	18,24	21,50	0,48						GEOCONTROL (1999)
NK-2G	133	2,76	18,24	21,62	0,51						GEOCONTROL (1999)
NK-2G	149	2,81	18,67	22,02	0,50						GEOCONTROL (1999)
NK-2G	163	2,78	18,29	21,72	0,52						GEOCONTROL (1999)
NK-2G	187	2,82	18,16	21,72	0,55						GEOCONTROL (1999)
NK-2G	213	2,81	18,17	21,71	0,55						GEOCONTROL (1999)
NK-3D	150	2,68	17,84	21,18	0,50						GEOCONTROL (1999)
NK-3D	150	2,68	17,60	21,04	0,52						GEOCONTROL (1999)
NK-3E	165	2,74	18,85	21,97	0,45						GEOCONTROL (1999)
NK-3E	168	2,71	17,89	21,29	0,52						GEOCONTROL (1999)
NK-3E	173	2,88	17,67	21,53	0,63						GEOCONTROL (1999)
NK-3E	184	2,82	18,44	21,89	0,53						GEOCONTROL (1999)
NK-3E	213	2,70	17,64	21,11	0,53						GEOCONTROL (1999)
KF-3I	256						0,97			4,67E-12	ETH-Zurich (2013)
KF-3I	298					38,57	1,384			9,92E-12	ETH-Zurich (2013)
KF-3I	318						3,079			1,62E-12	ETH-Zurich (2013)
KF-3H	223						0,935			9,36E-13	ETH-Zurich (2013)
KF-3H	223					26,88	0,765			3,86E-13	ETH-Zurich (2013)
KF-19	49						1,2			9,40E-12	ETH-Zurich (2013)
KF-19	82					21,75	0,219			1,13E-11	ETH-Zurich (2013)
KF-20	49						0,753			2,09E-11	ETH-Zurich (2013)
KF-20	79						0,373			1,15E-11	ETH-Zurich (2013)
KF-21	79					26,17	0,312			5,70E-12	ETH-Zurich (2013)
KF-21	116						0,753			2,09E-12	ETH-Zurich (2013)
KF-10	26					22,75	0,32			6,69E-12	ETH-Zurich (2013)

Tabla II - 6. Datos de las arenas bioclásticas empleados en el estudio estadístico

Sondeo	Prof. (m)	$\omega$ (%)	$G_s$	$S_v$ (%)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Finos (%)	IP	Permeabilidad (m/s)	Referencia
KF-16	51,25	15,8			19,5	22,6			No plástico		CEDEX (2005)
KF-16	51,25										CEDEX (2005)
KF-16	53,3	15,9	2,76	92,9	18,73		21,9	6,14		6,11E-08	CEPASA (2005)
KF-16	53,8	15,8			19,7	23,4			No plástico		CEDEX (2005)
KF-16	53,8	17,0			19,6	22,9			No plástico		CEDEX (2005)
KF-16	53,8									1,50E-06	CEDEX (2005)
KF-16	53,8										CEDEX (2005)
KF-16	56,3	21,0	2,8	99,8	17,6		21,3	7,61		1,48E-09	CEPASA (2005)
KF-16	58,1									9,70E-07	CEDEX (2005)
KF-16	58,8	17,6			19,1	22,5			No plástico		CEDEX (2005)
KF-16	58,8										CEDEX (2005)
KF-16	59,8	21,6	2,76	97,7	17,11		20,9	5,7		2,28E-07	CEPASA (2005)
KF-16	61,25	11,6			21,3	23,8			No plástico		CEDEX (2005)
KF-16	61,25									8,80E-08	CEDEX (2005)
KF-16	61,25										CEDEX (2005)
KF-16	63,9	22,4	2,75	97,2	16,85		20,7	6,36		7,45E-10	CEPASA (2005)
KF-16	66	17,4			19,6	23			No plástico		CEDEX (2005)
KF-16	66									1,10E-05	CEDEX (2005)
KF-16	66										CEDEX (2005)
KF-16	68,3	16,2	2,8	99,9	19,28		22,4	14,03		2,88E-08	CEPASA (2005)

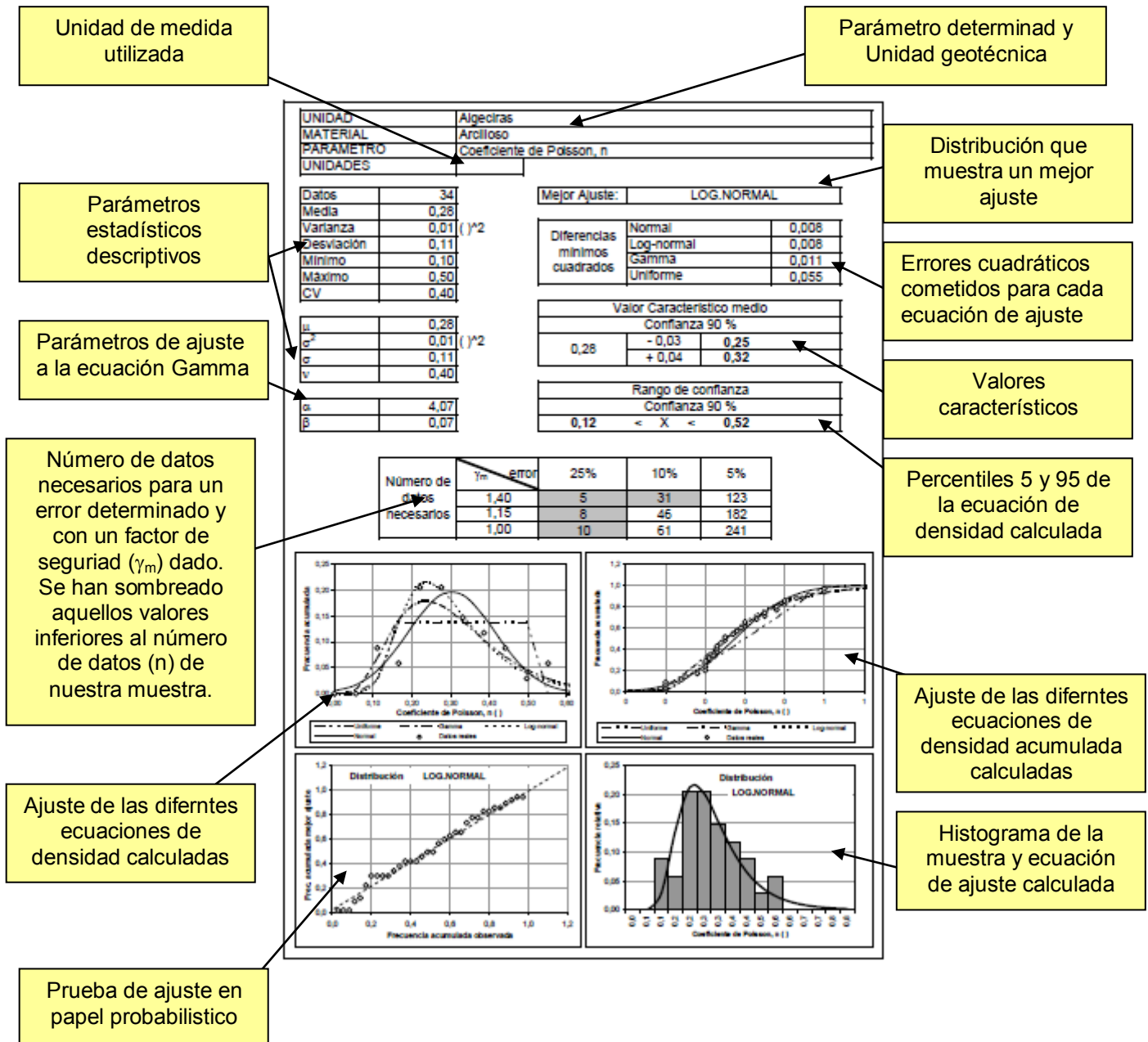
## **APÉNDICE III**

### **ANÁLISIS ESTADÍSTICO**



# APÉNDICE III: ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Este apéndice incluye el análisis estadístico realizado en para cada parámetro estudiado. Para cada parámetro, en cada unidad, se ha creado una tabla como la siguiente:



## Unidad de Algeciras

UNIDAD	Algarizas
MATERIAL	Arcilloso
PARAMETRO	Densidad seca in situ
UNIDADES	kg/m <sup>3</sup>

Mejor Ajuste:		LOG.NORMAL
Diferencias mínimas cuadrados	Normal	0.009
	Log-normal	0.007
	Gamma	0.050
	Uniforme	0.123

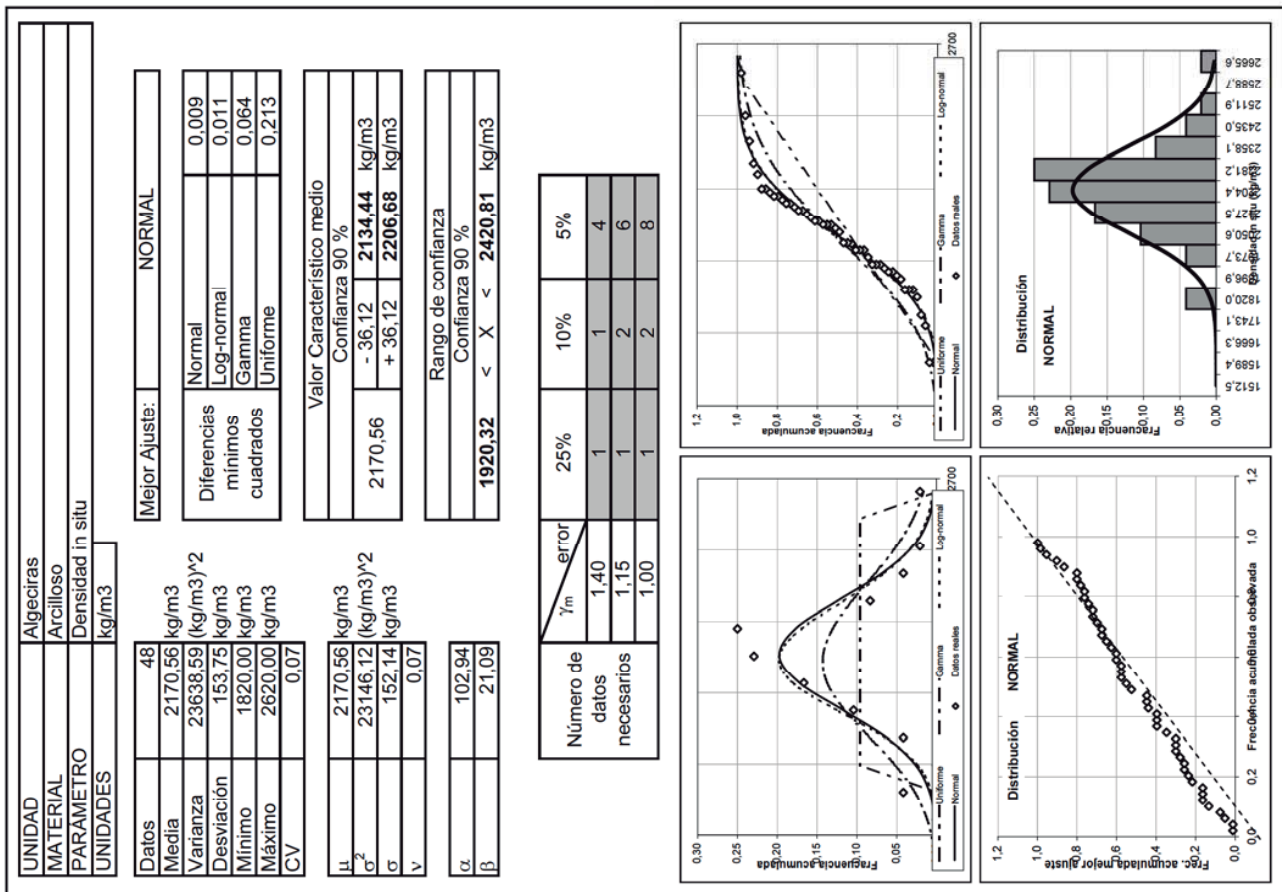
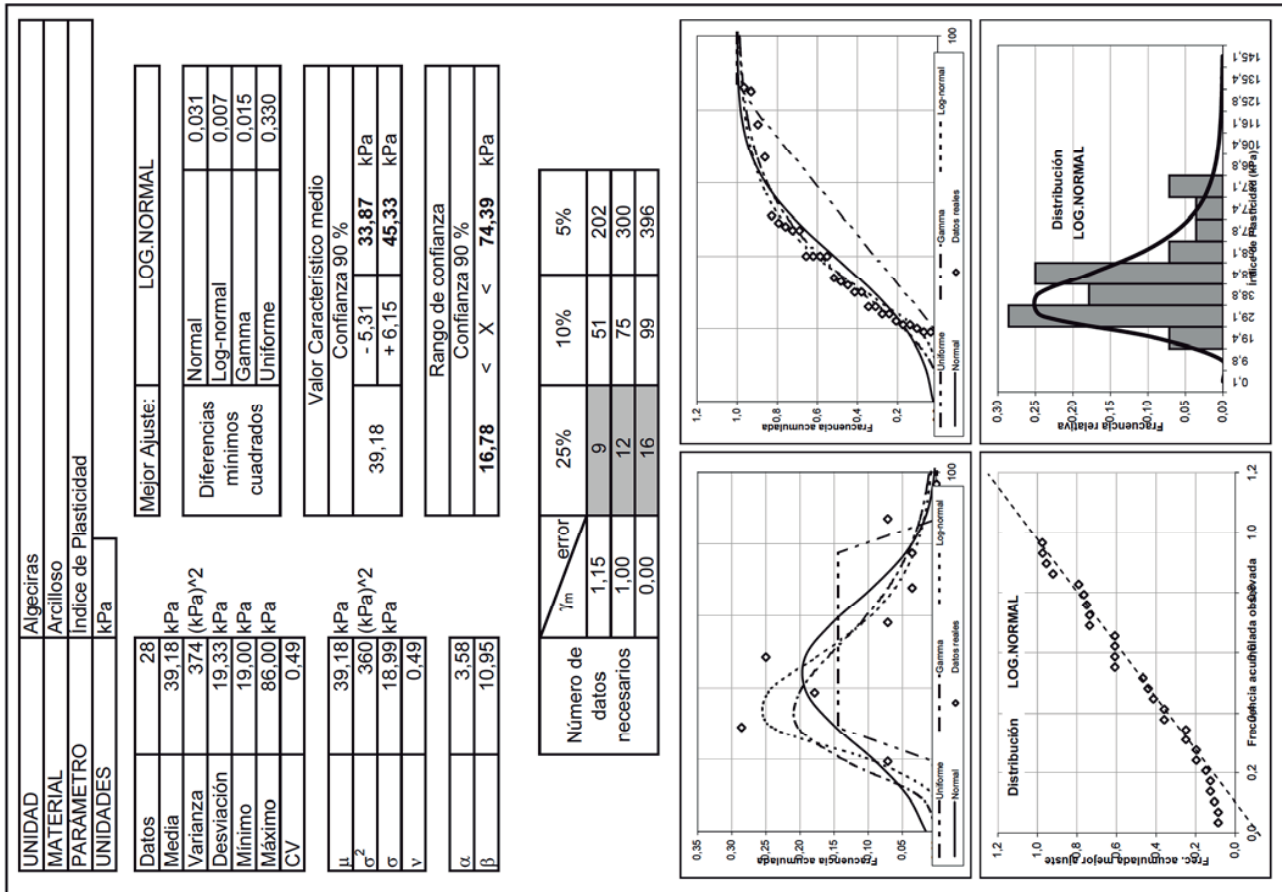
Valor Característico medio	
Confianza 90 %	
1952,50	- 39,18 <b>1913,32</b> kg/m <sup>3</sup>
	+ 39,98 <b>1992,48</b> kg/m <sup>3</sup>

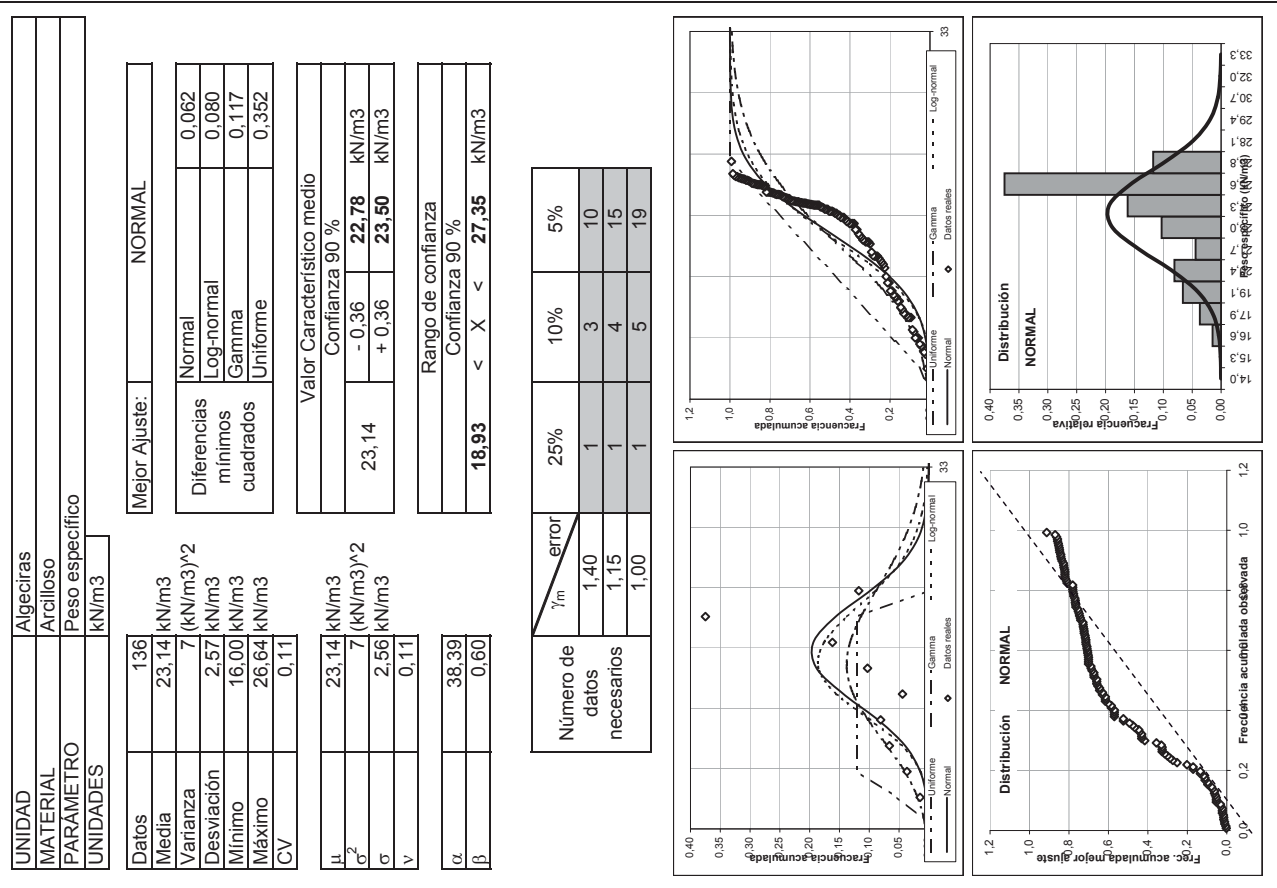
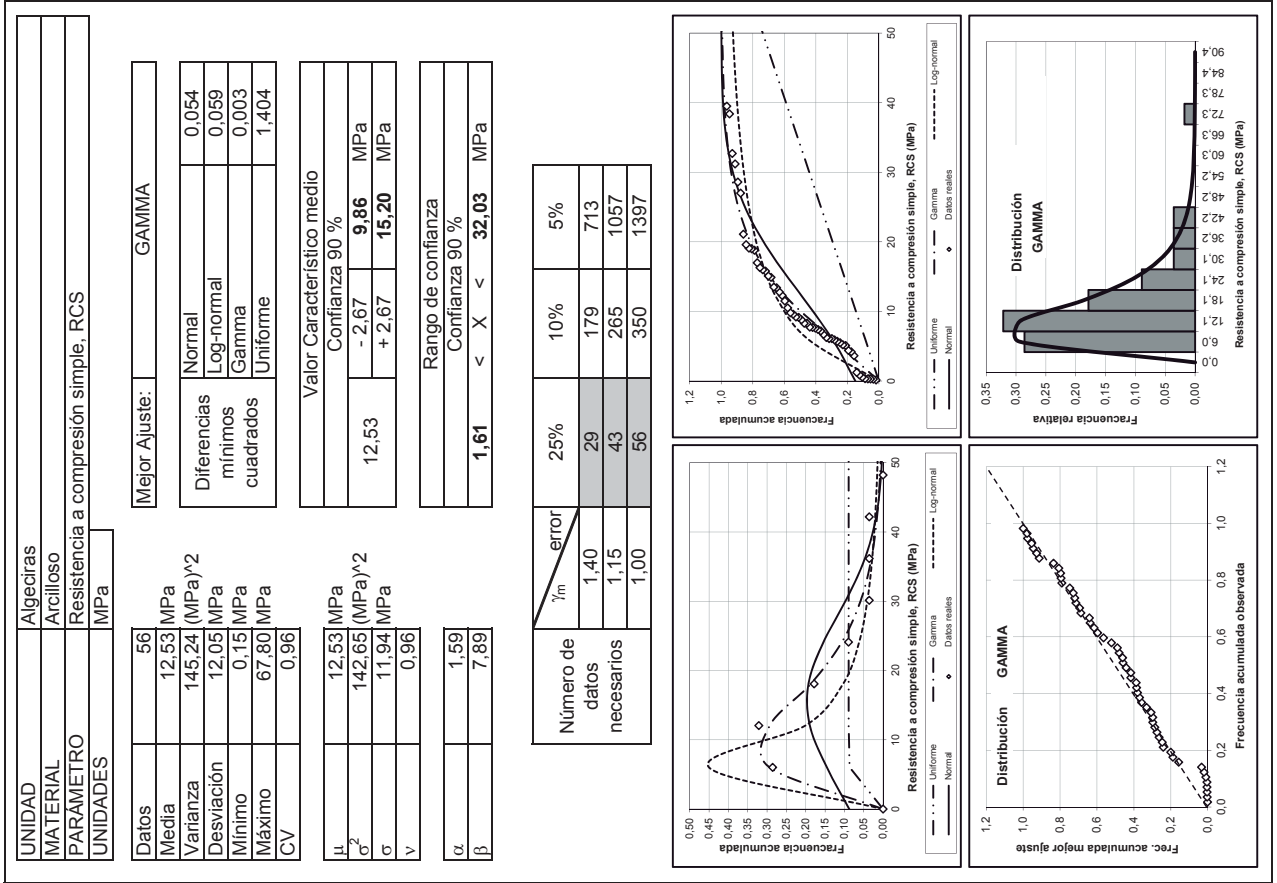
  

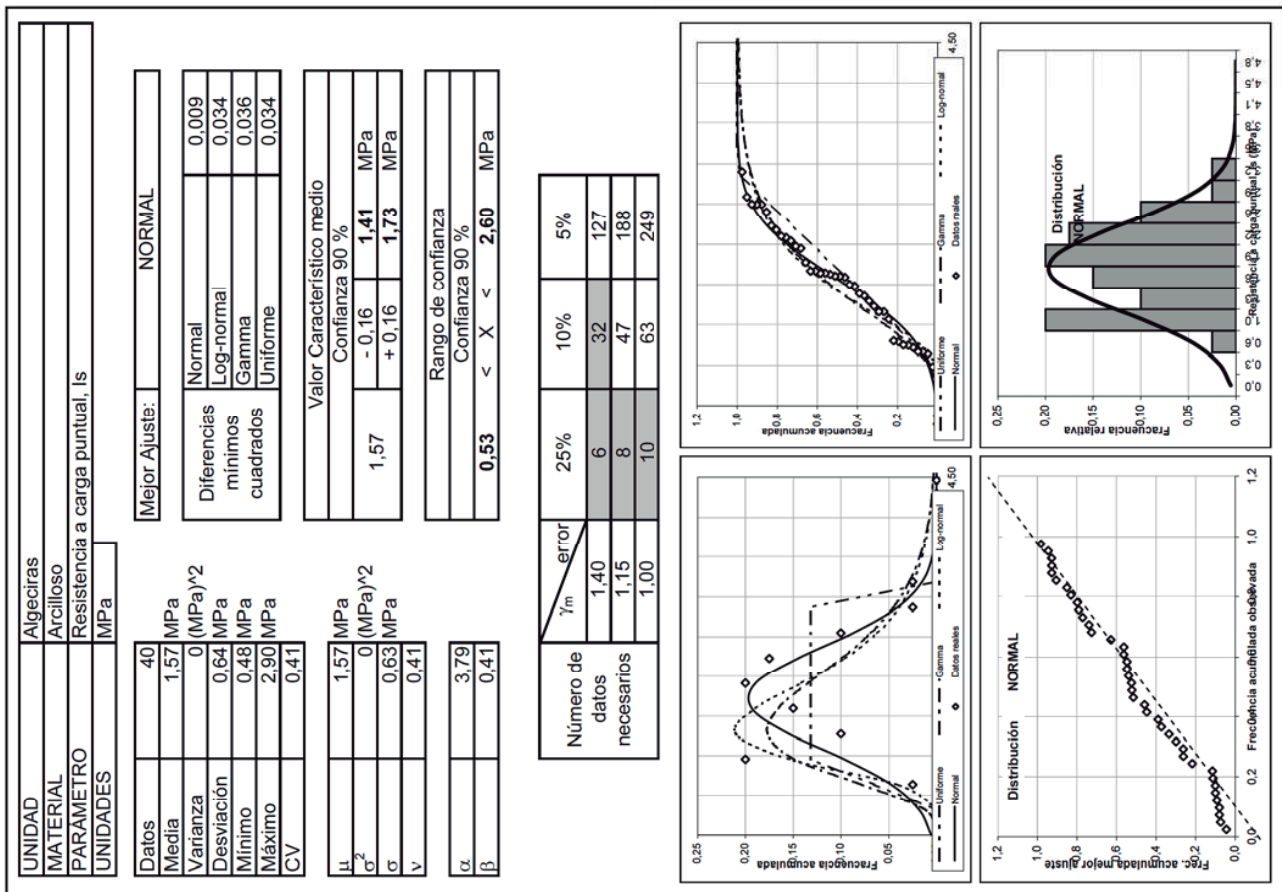
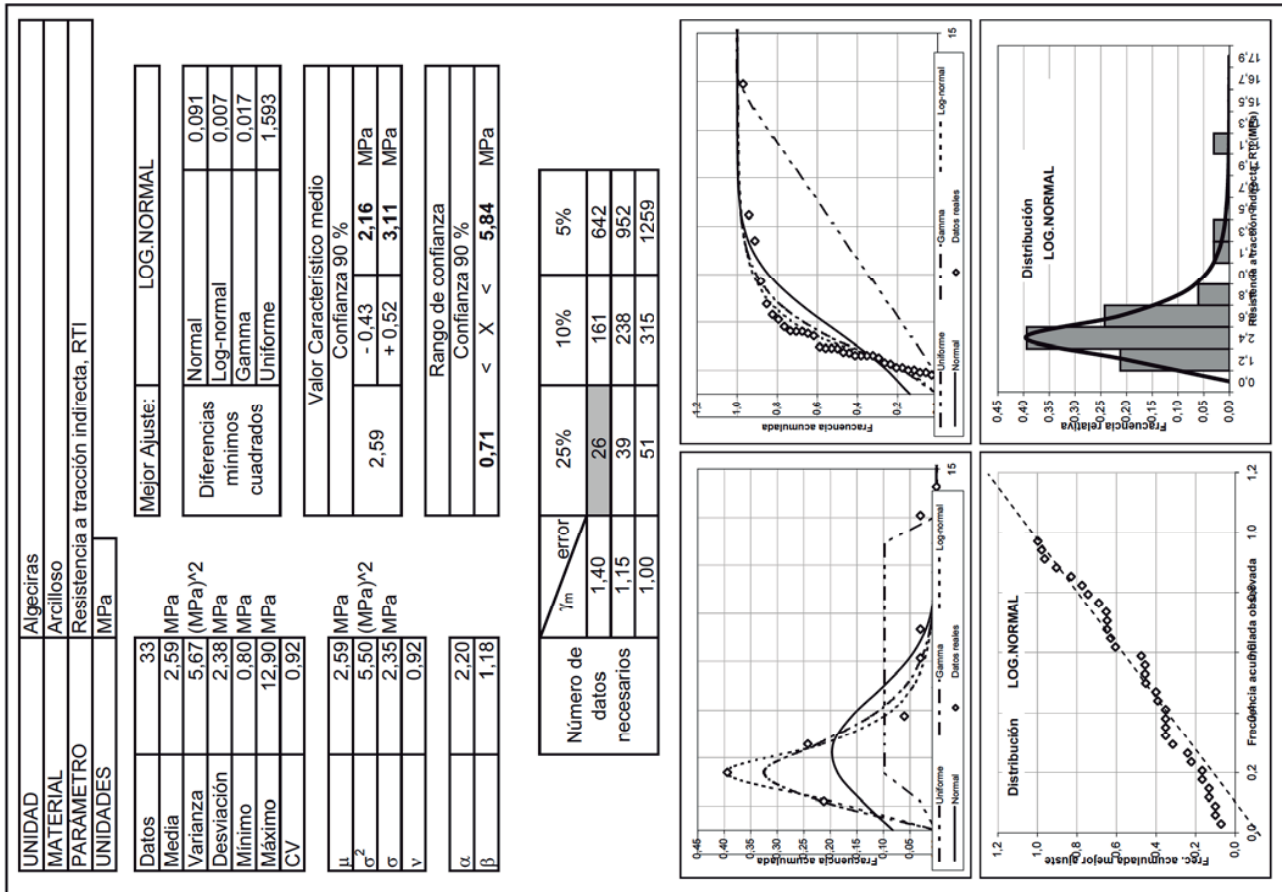
Rango de confianza	
Confianza 90 %	
<b>1690,63</b>	< X < <b>2238,88</b> kg/m <sup>3</sup>

Número de datos necesarios	$\gamma_m$ error		5%
	25%	10%	
1,40	1	2	6
1,15	1	3	9
1,00	1	3	12









UNIDAD	Alcigras
MATERIAL	Arcilloso
PARAMETRO	Coefficiente de Poisson, n
UNIDADES	

Mejor Ajuste:		LOG. NORMAL
Datos	34	
Media	0.28	
Varianza	0.01	( $\gamma^2$ )
Desviación	0.11	
Mínimo	0.10	
Máximo	0.50	
CV	0.40	

Valor Característico medio	
Confianza 90 %	
0,28	- 0,03 <b>0,25</b>
	+ 0,04 <b>0,32</b>

Rango de confianza	
Confianza 90 %	
<b>0,12</b>	< X < <b>0,52</b>

Número de datos necesarios	$\gamma_m$ error			
	1,40	25%	10%	5%
1,15	5	31	123	
1,10	8	46	182	
1,00	10	61	241	

UNIDAD	Algasiras
MATERIAL	Arcilloso
PARAMETRO	Módulo de Young, Ei
UNIDADES	MPa

	Mejor Ajuste:	NORMAL
Datos	44	
Media	4394.30 MPa	
Varianza	9841808.86 (MPa) <sup>2</sup>	0.012
Desviación	3137.17 MPa	0.074
Mínimo	200.00 MPa	0.022
Máximo	13798.00 MPa	0.362
CV	0.71	

	Valor Característico medio
$\mu$	Confianza 90 %
$\sigma^2$	- 769.04 <b>3625.26</b> MPa
$\sigma$	+ 769.04 <b>5163.34</b> MPa
$V$	0.71

	Rango de confianza
$\alpha$	Confianza 90 %
$\beta$	<b>0.00</b> < X < <b>9495.50</b> MPa

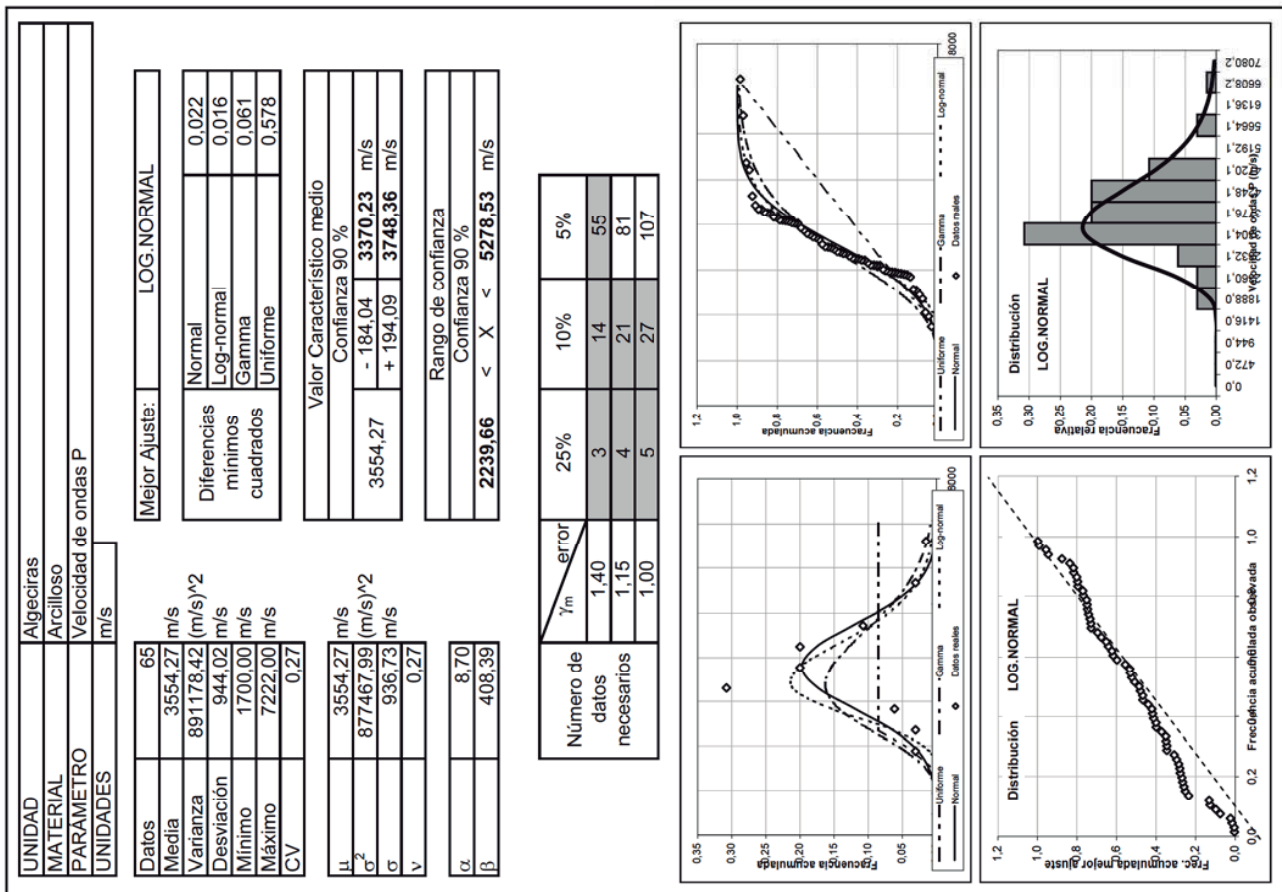
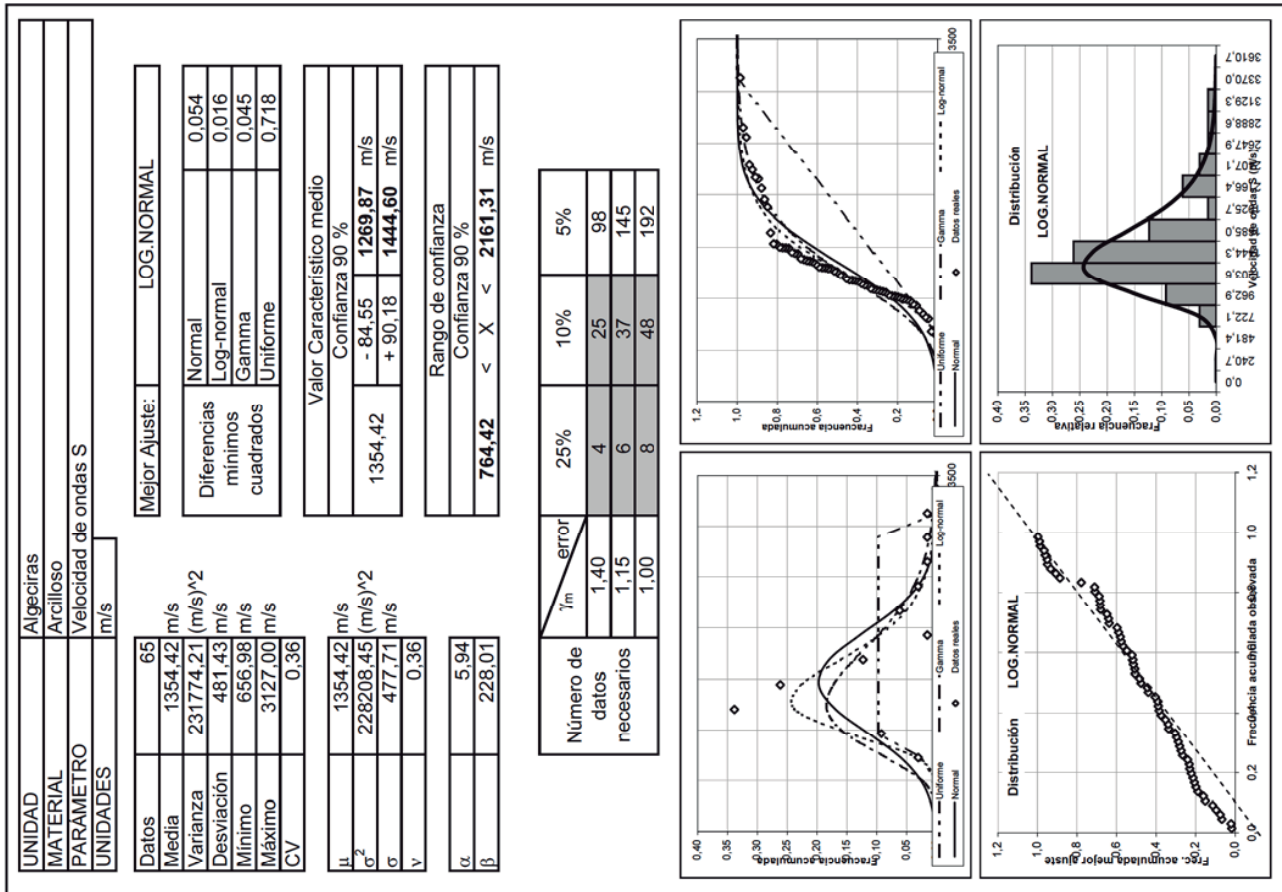
  

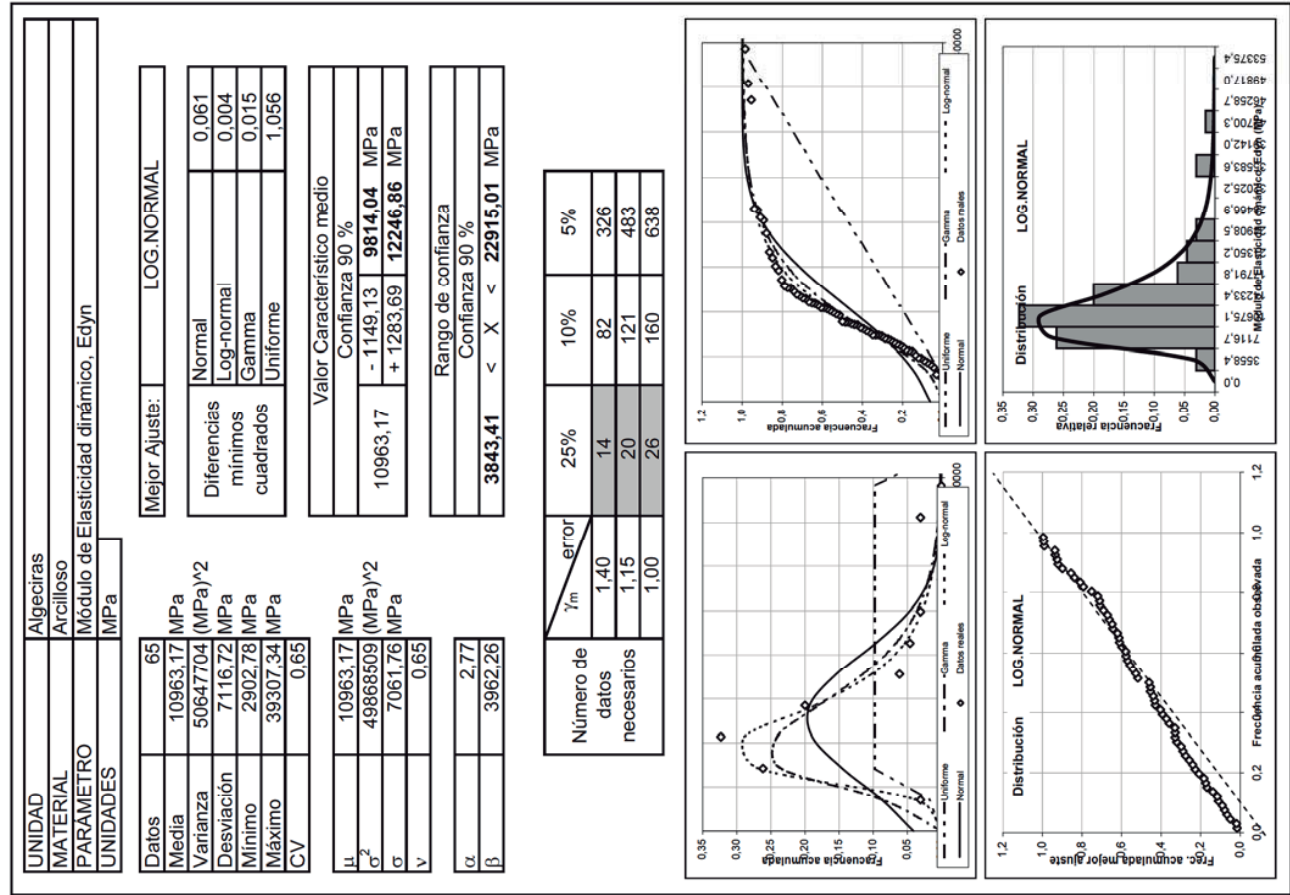
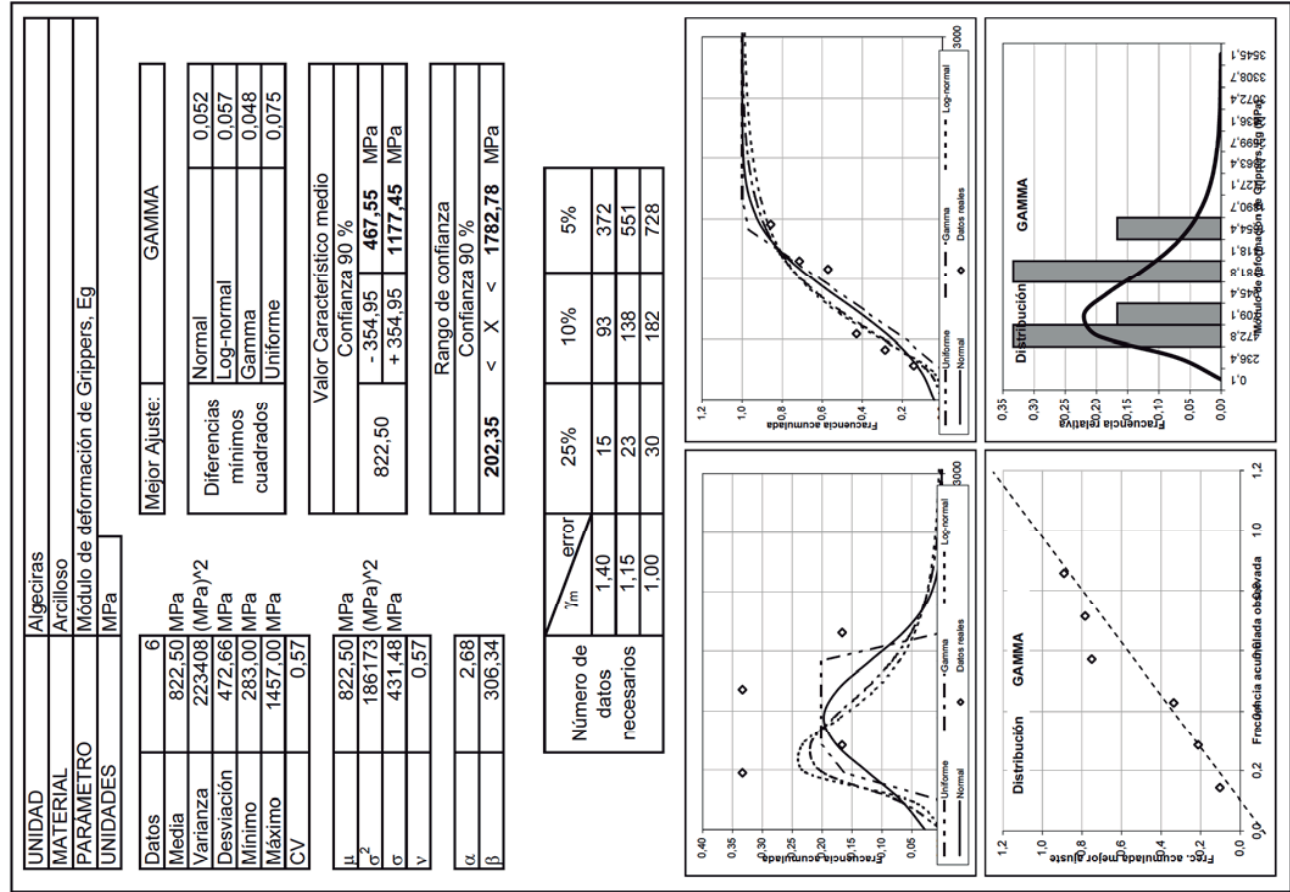
Número de datos necesarios	$\gamma_m$ error		5%
	1.15	1.00	
16	16	98	391
24	24	145	579
31	31	192	766

Distribución NORMAL

Distribución NORMAL





UNIDAD	Algas
MATERIAL	Alcornoque
PARÁMETRO	Índice de Desmoronamiento, ID2
UNIDADES	%

Mejor Ajuste:		NORMAL	
Datos	15		
Media	95,37 %		
Varianza	75,86 (%) <sup>2</sup>		
Desviación	8,71 %		
Mínimo	64,20 %		
Máximo	99,20 %		
CV	0,09		

Valor Característico medio	
Confianza 90 %	
95,37	- 3,83 <b>91,54</b> %
	+ 3,83 <b>99,20</b> %

Rango de confianza	
Confianza 90 %	
<b>80,55</b>	< X < <b>110,19</b> %

Número de datos necesarios	$\gamma_m$ error		
	25%	10%	5%
1,40	1	2	7
1,15	1	3	10
1,00	1	3	12

Three plots for the first data set: a histogram of relative frequency, a Q-Q plot showing data points following a normal distribution line, and a P-P plot showing data points following a normal distribution line.

Three plots for the second data set: a histogram of relative frequency, a Q-Q plot showing data points following a normal distribution line, and a P-P plot showing data points following a normal distribution line.

UNIDAD	Algasiras
MATERIAL	Arcilloso
PARÁMETRO	Módulo presiométrico, Ep
UNIDADES	MPa

Mejor Ajuste:		LOG.NORMAL
Datos	55	
Media	1223,52 MPa	
Varianza	1553889 (MPa) <sup>2</sup>	
Desviación	1246,55 MPa	
Mínimo	48,00 MPa	
Máximo	5455,66 MPa	
CV	1,02	

Valor Característico medio	
Confianza 90 %	
$\sigma^2$	- 272,17 <b>951,35</b> MPa
$\sigma$	+ 350,03 <b>1573,55</b> MPa

Rango de confianza	
Confianza 90 %	
$\alpha$	1,60
$\beta$	765,89

Número de datos necesarios	$\gamma_m$ error		5%
	1,40	32	
1,15	48	297	1185
1,00	63	392	1566

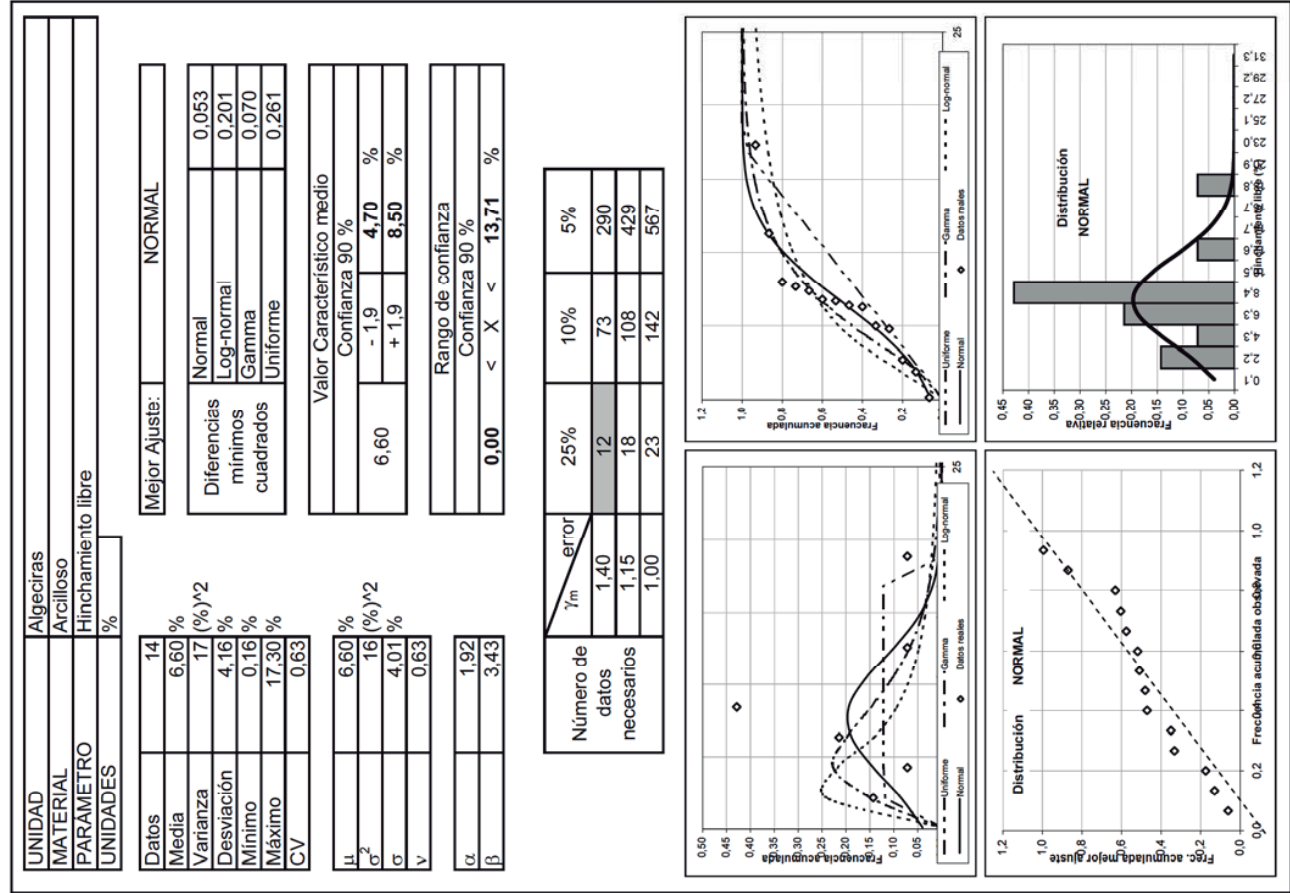
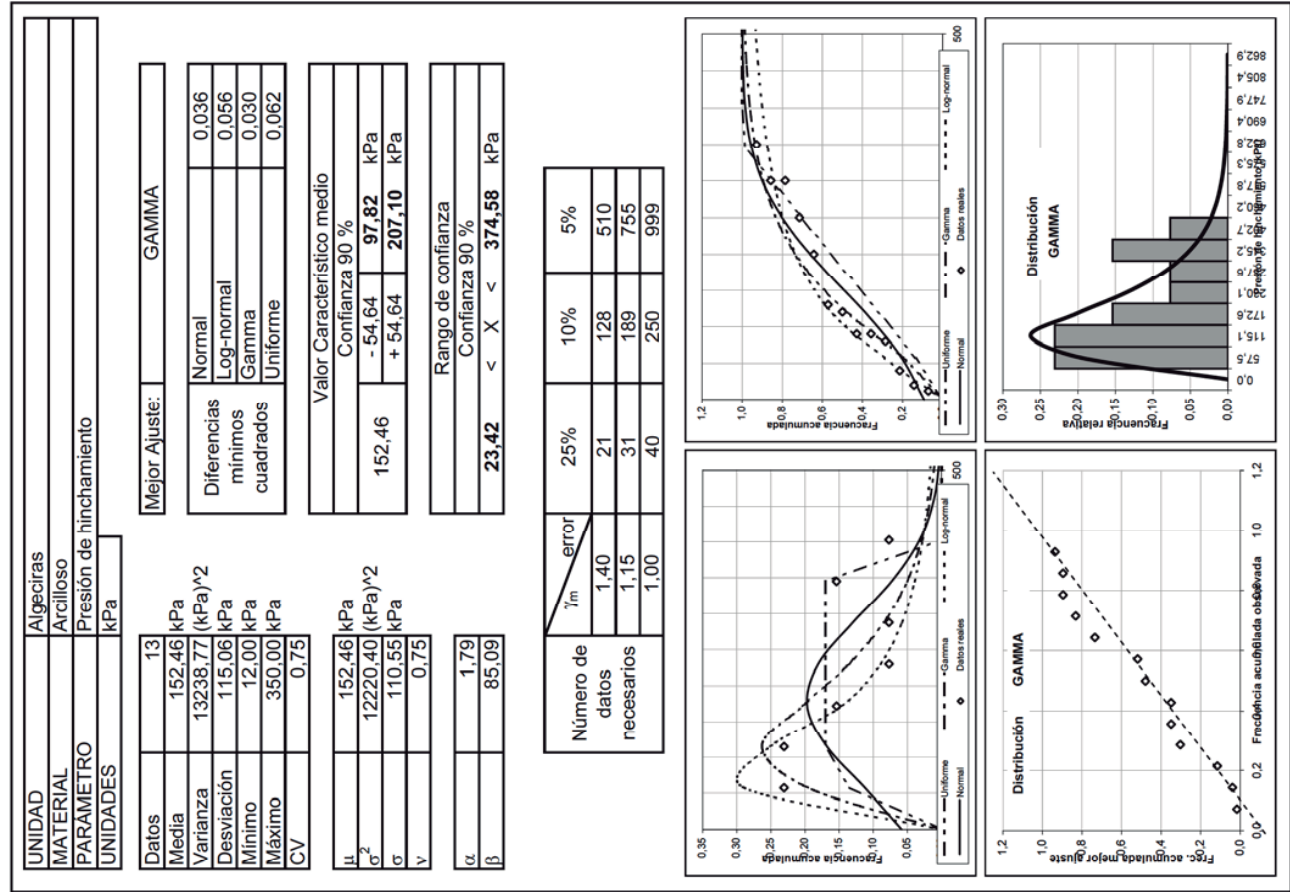
  

LOG-NORMAL

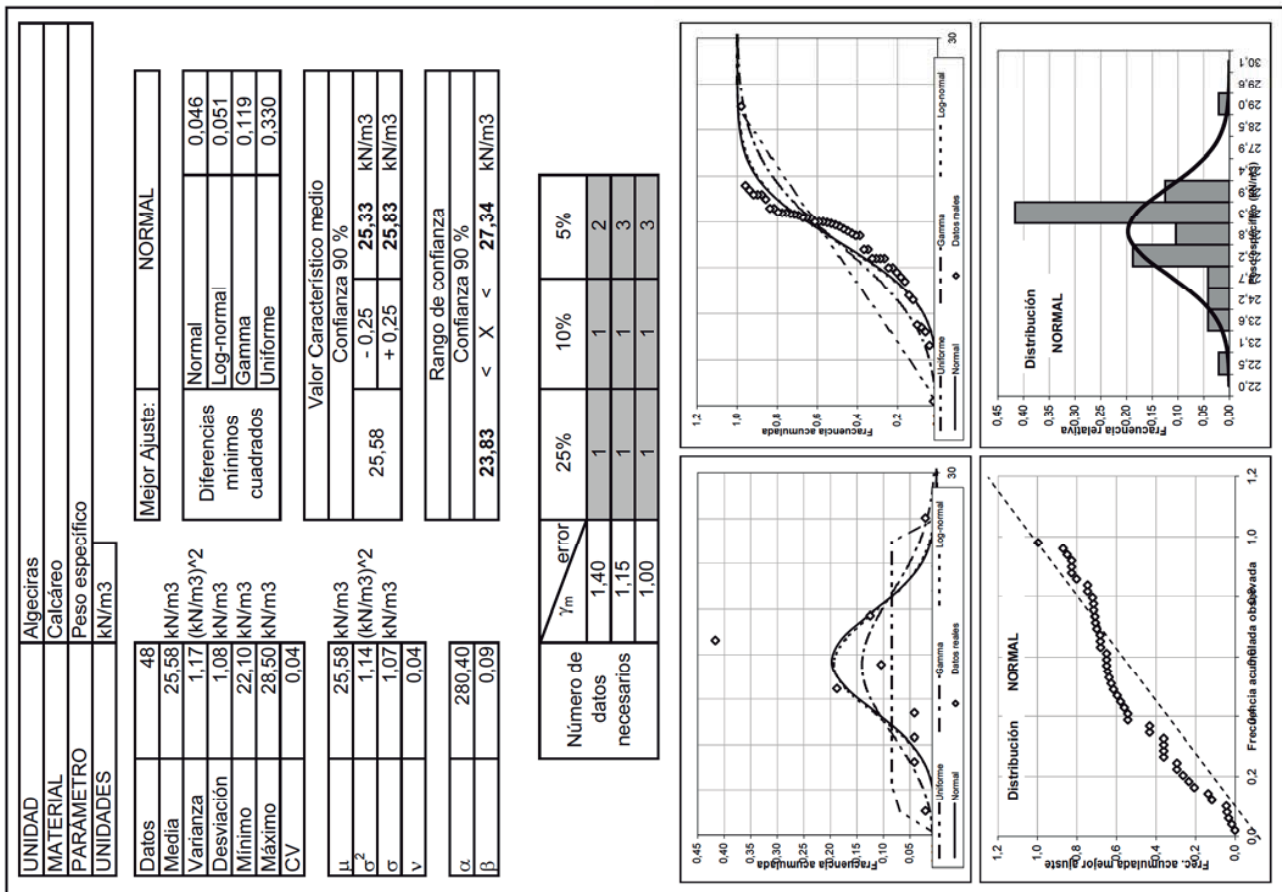
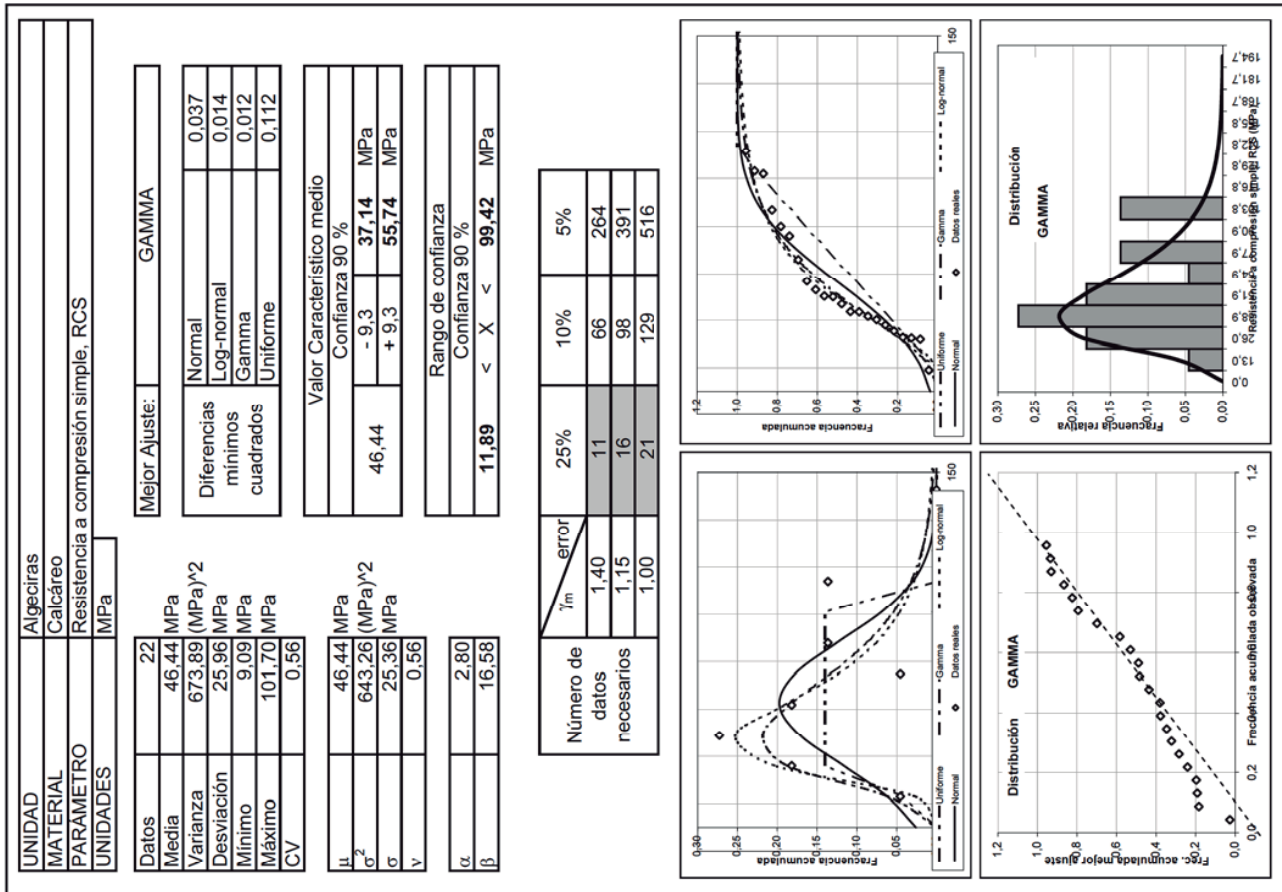
LOG-NORMAL

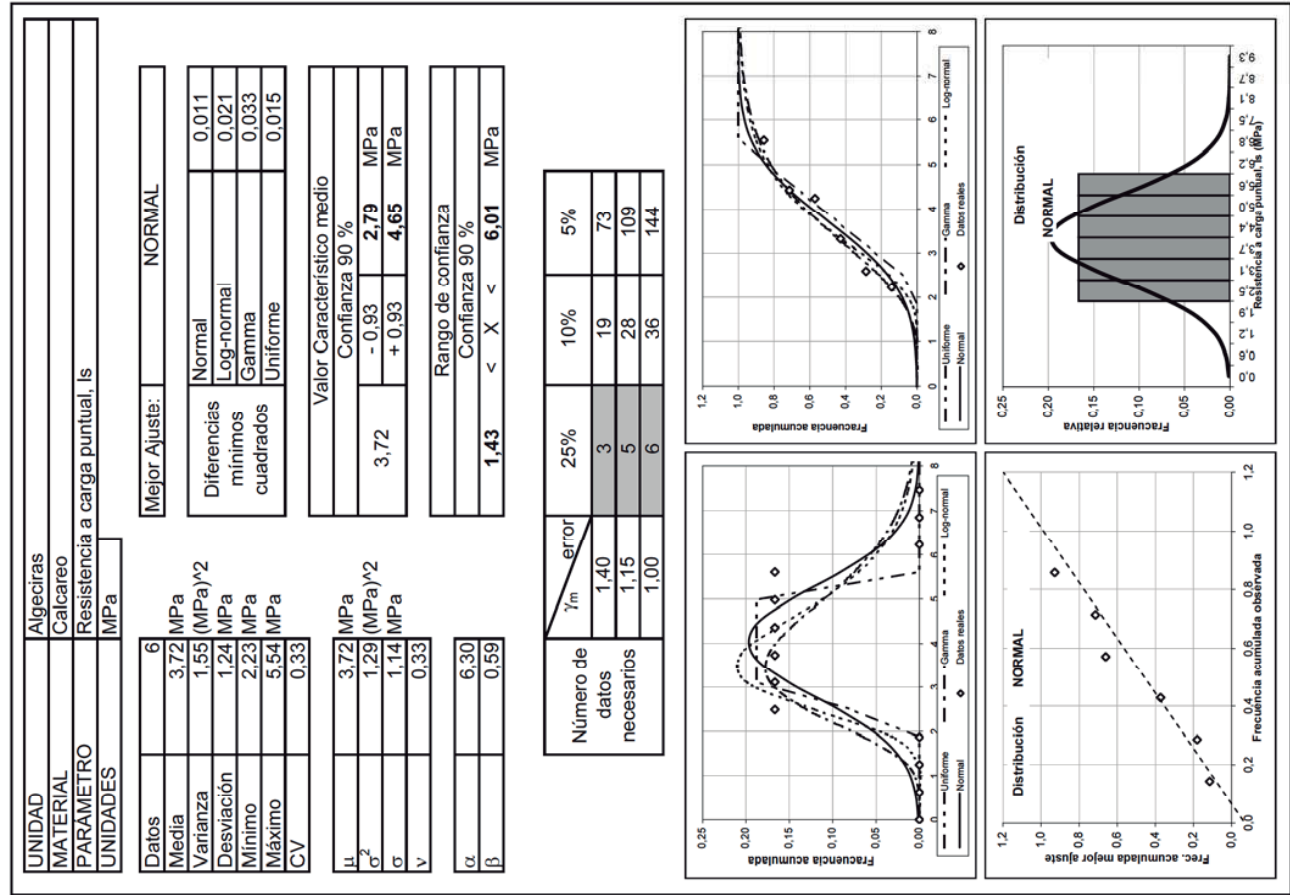
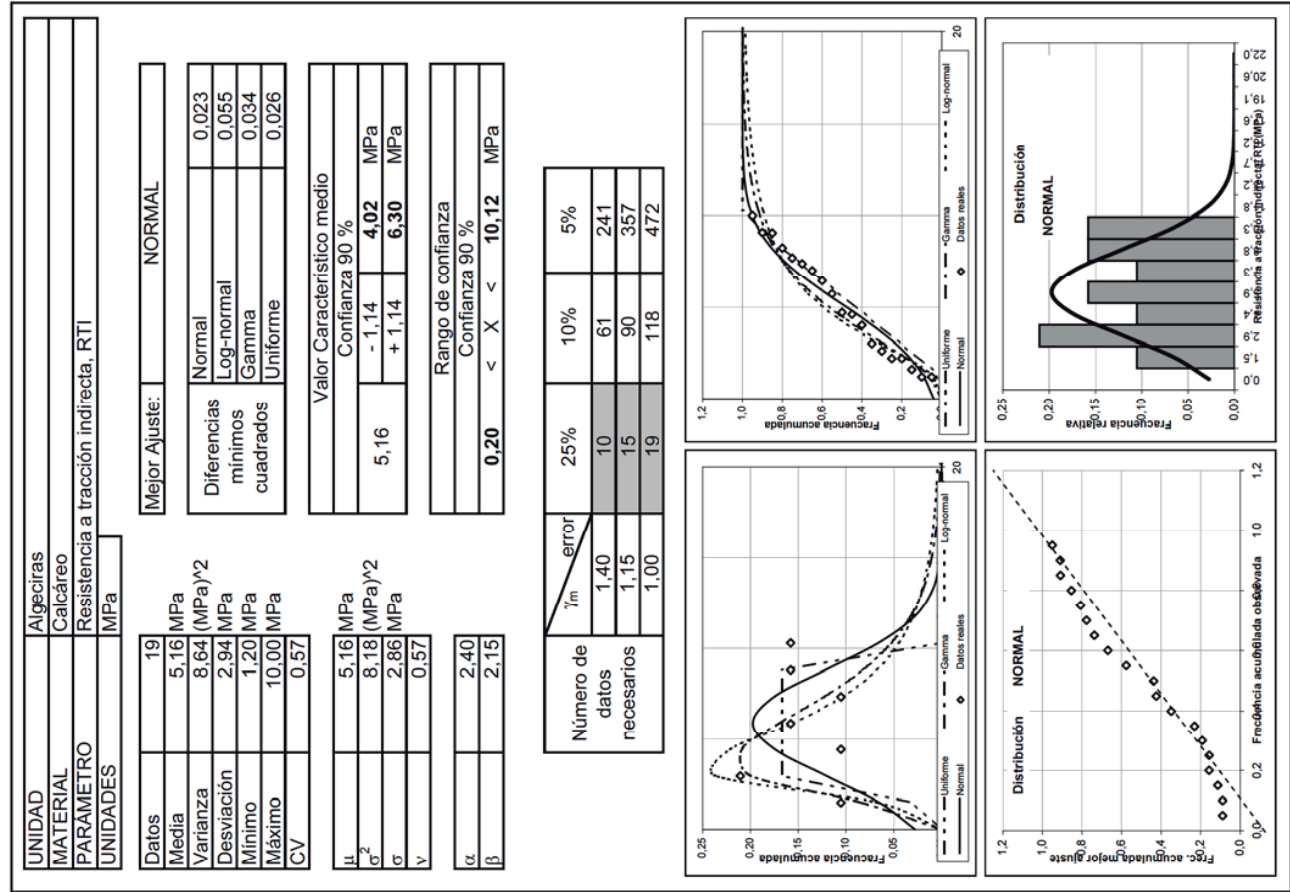
LOG-NORMAL

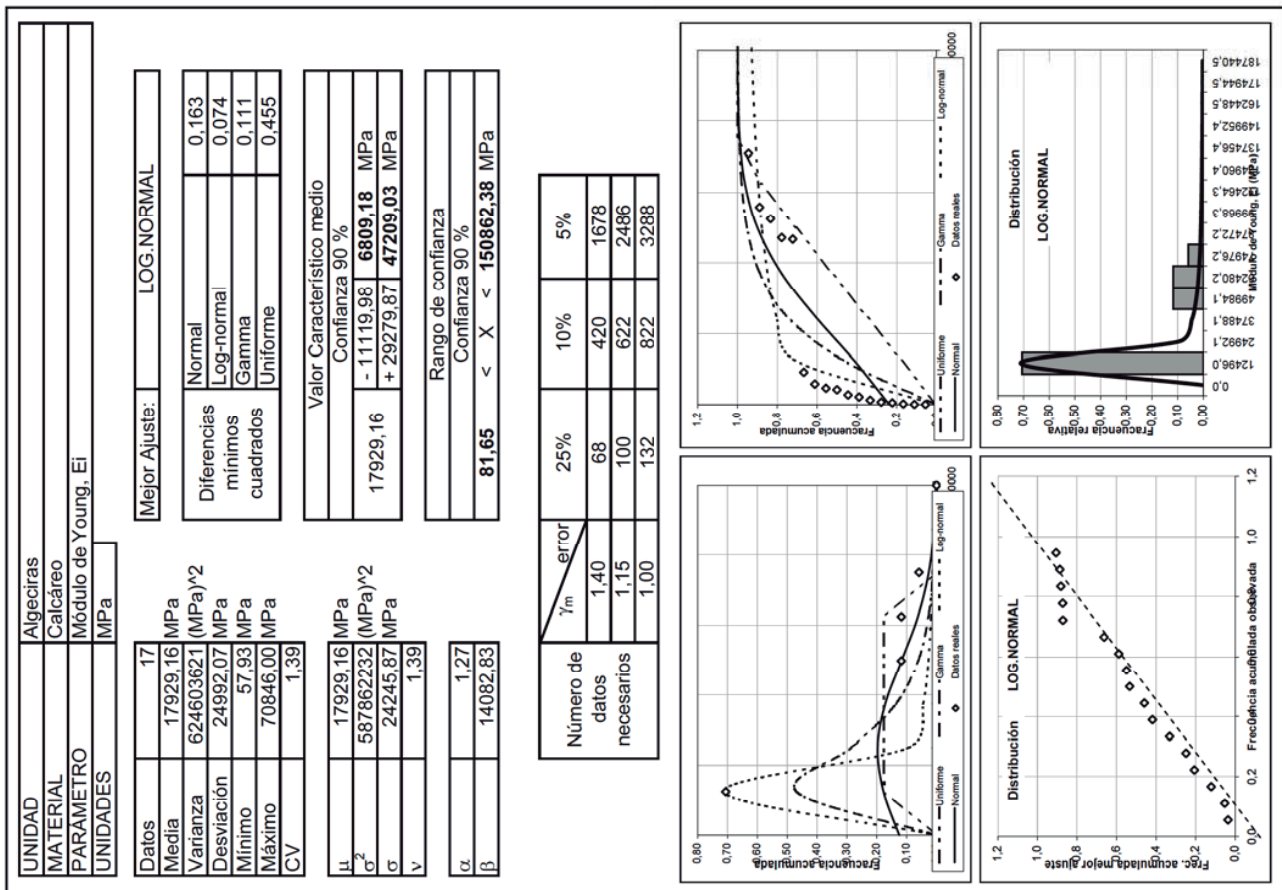
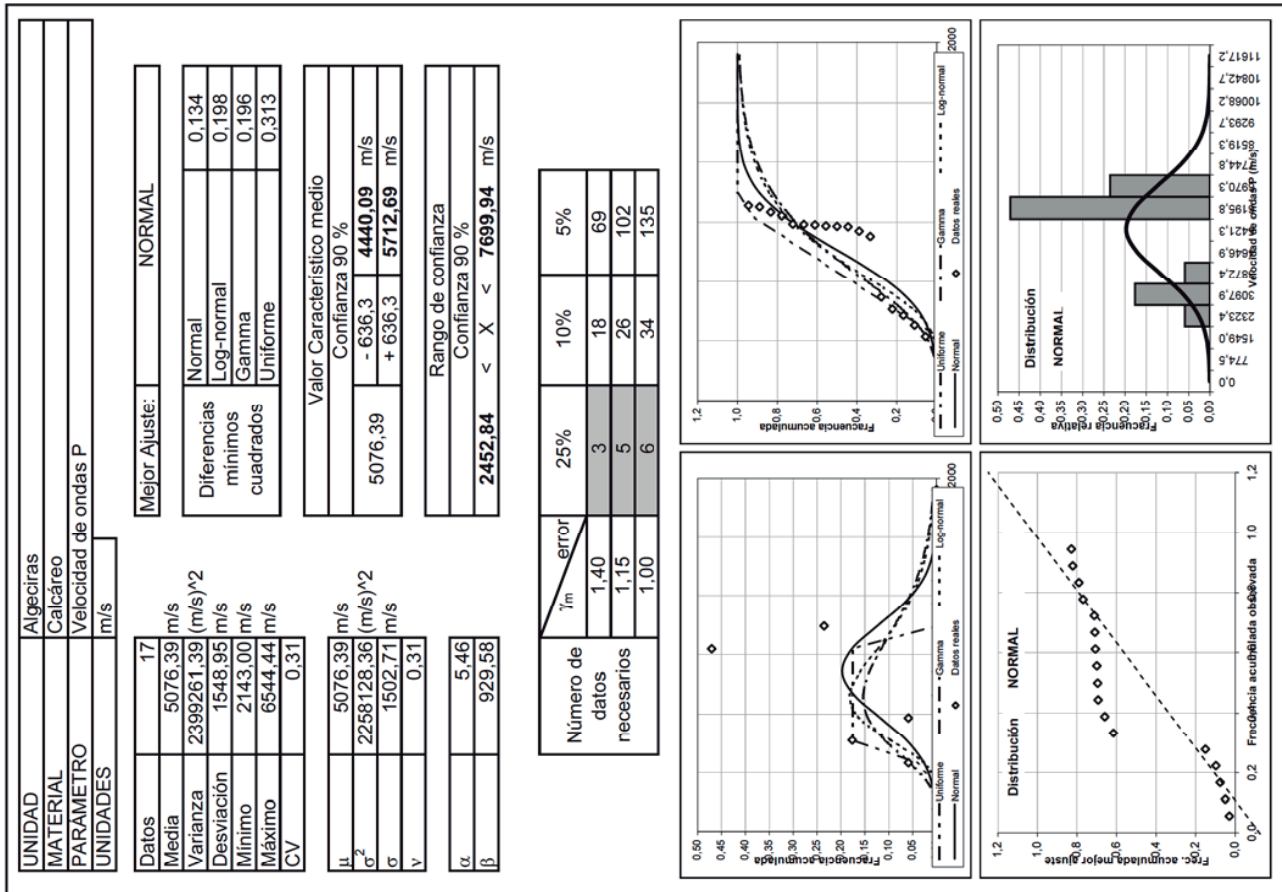
LOG-NORMAL



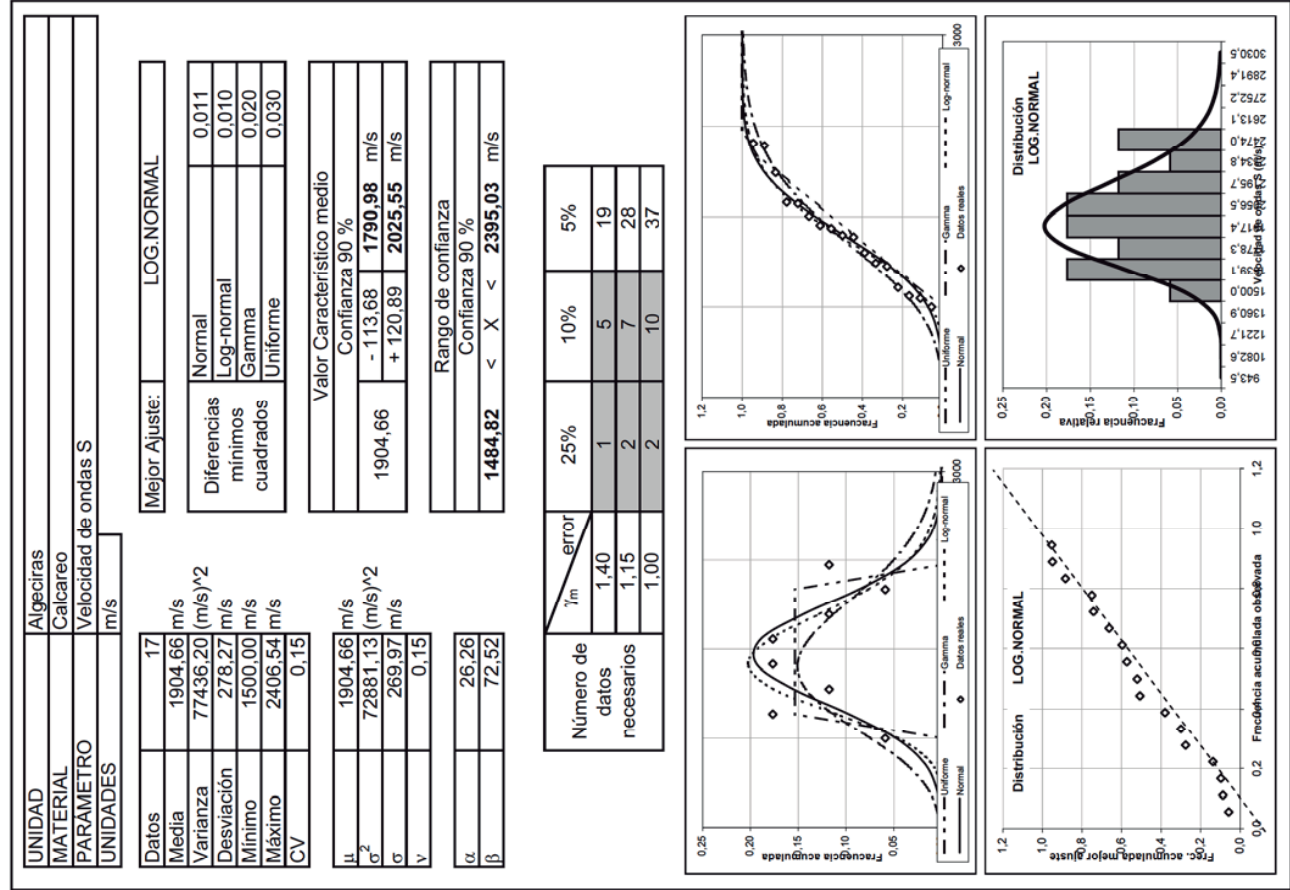


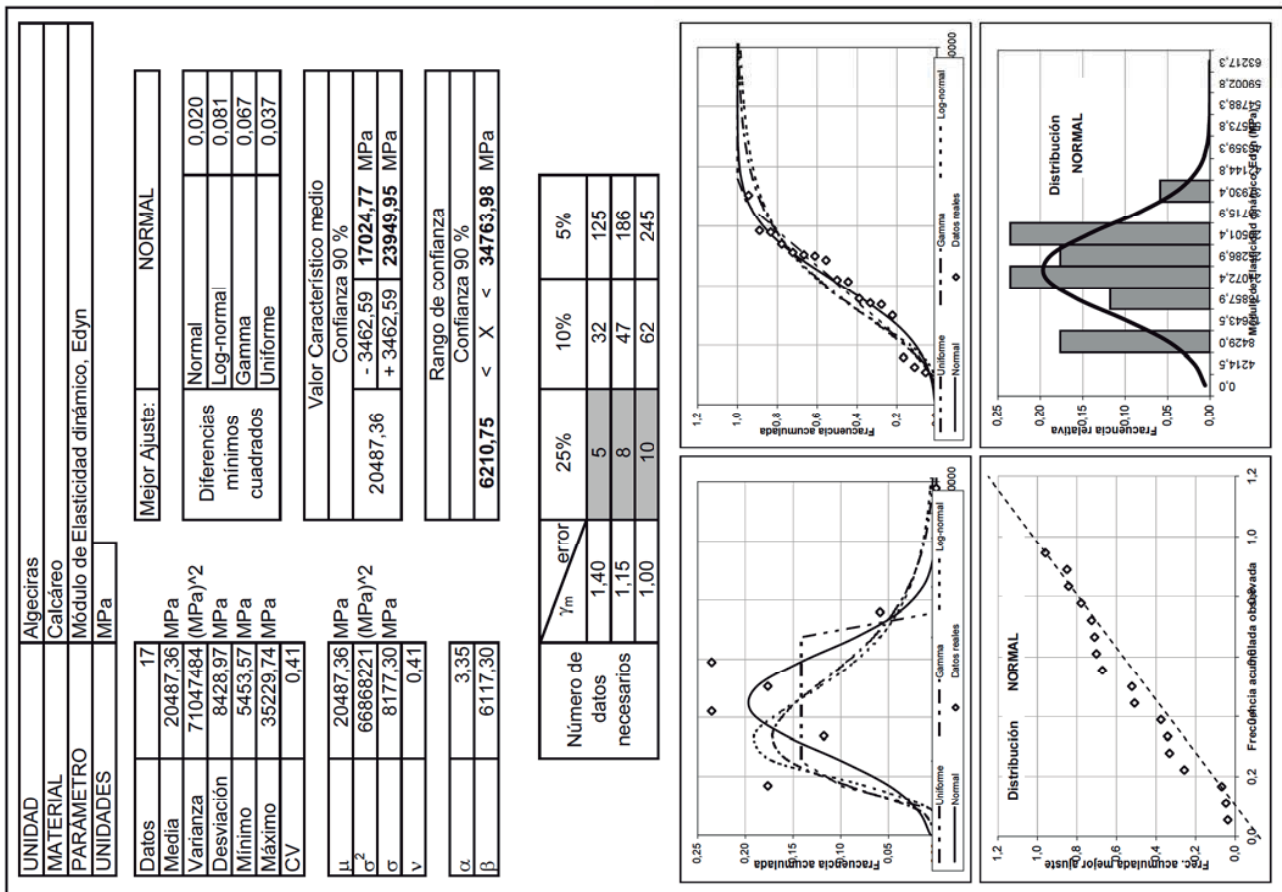
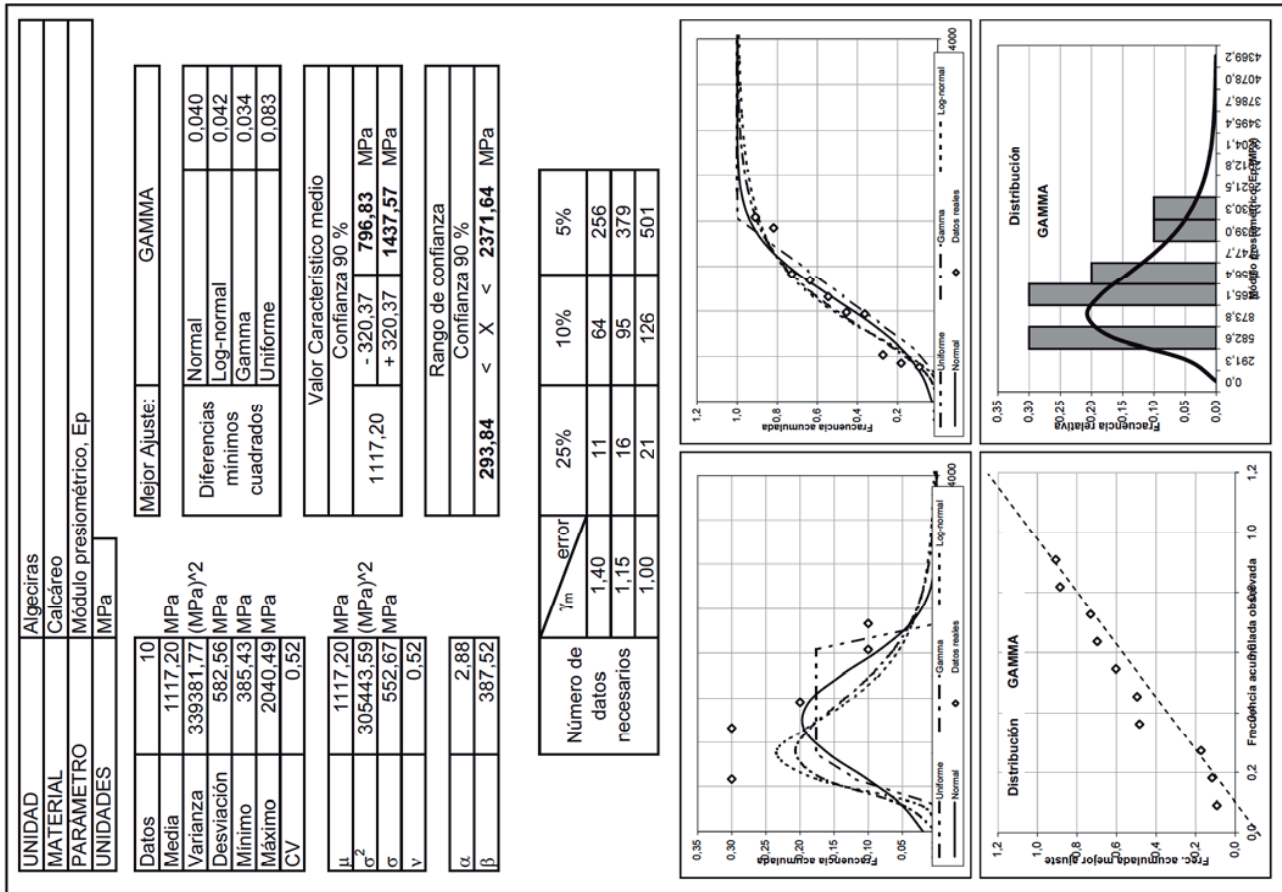


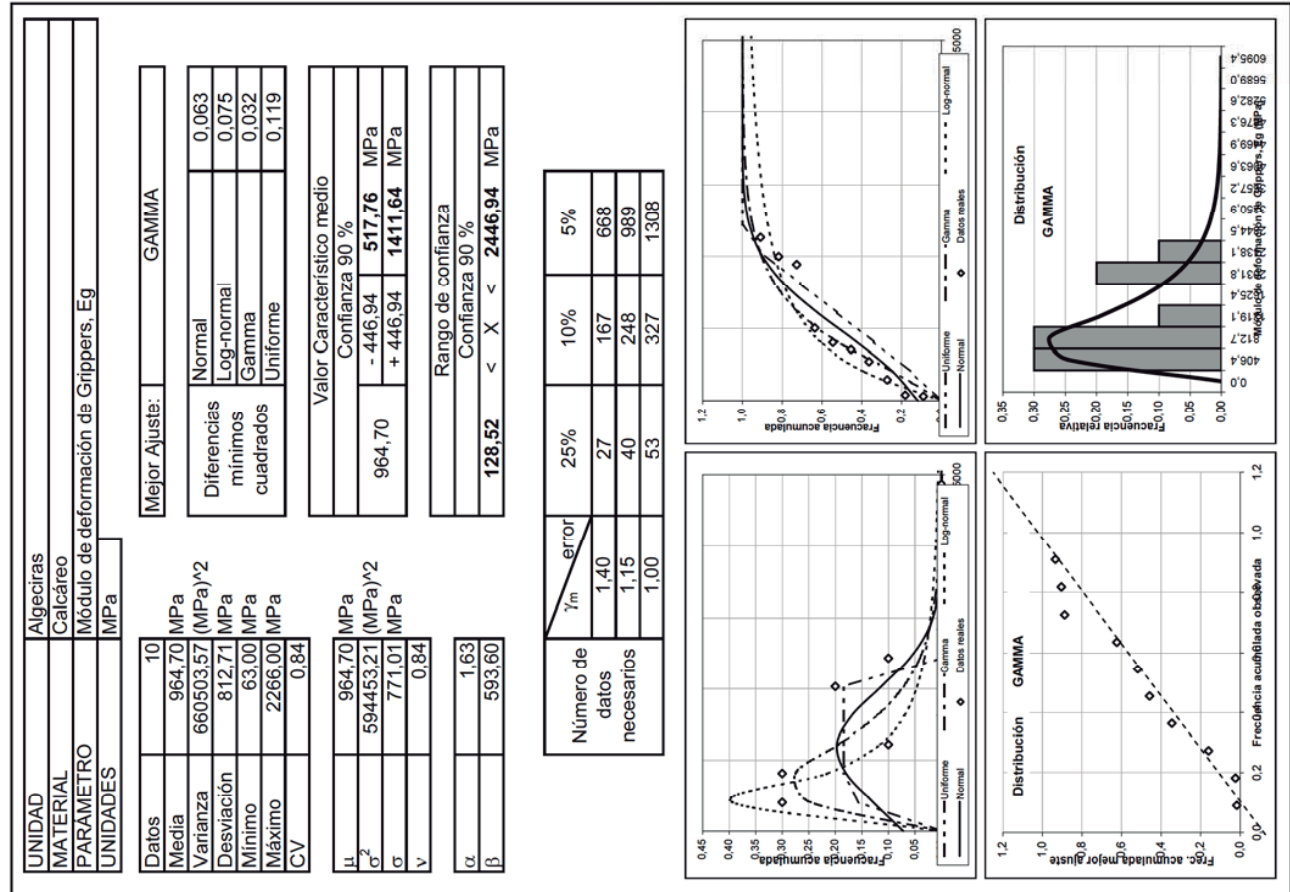
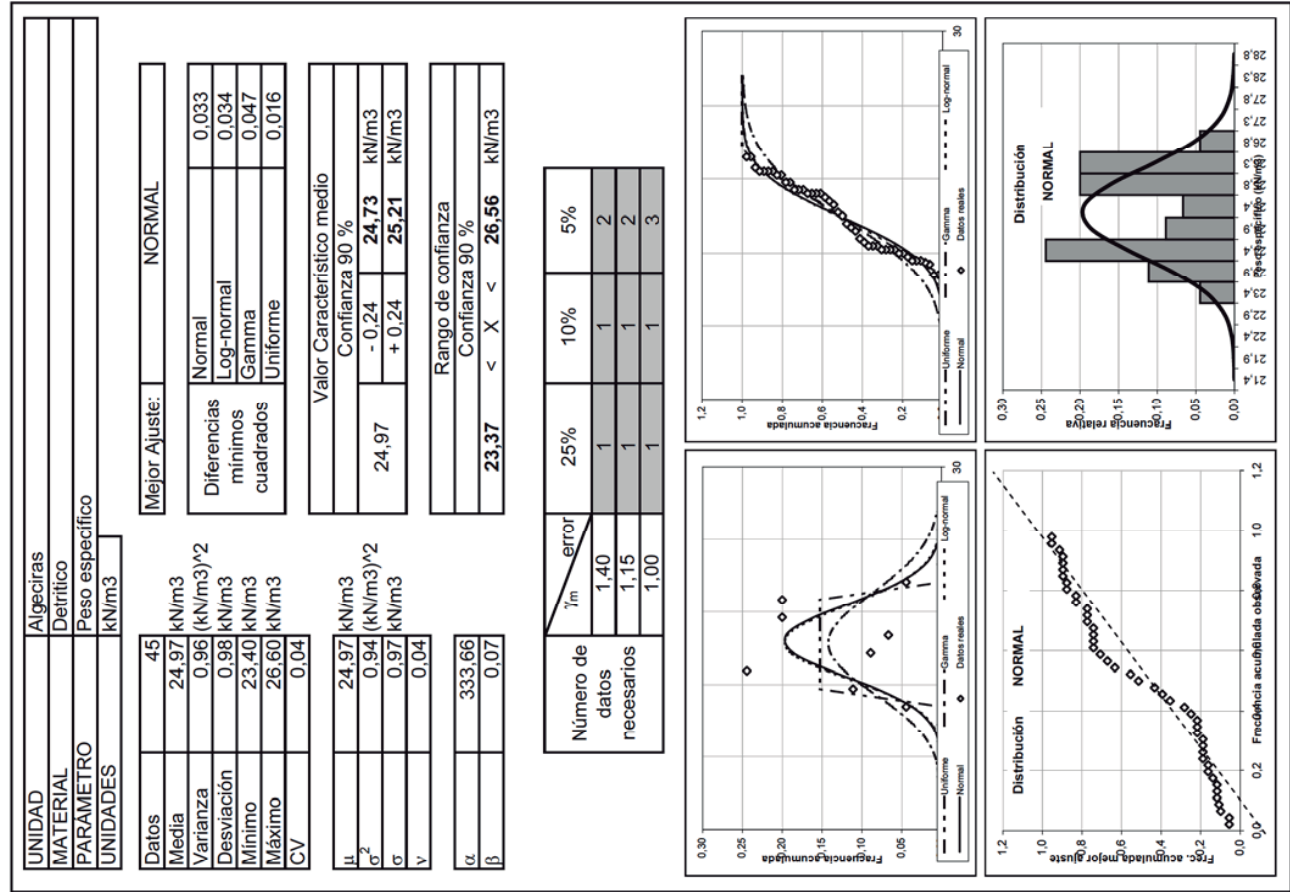


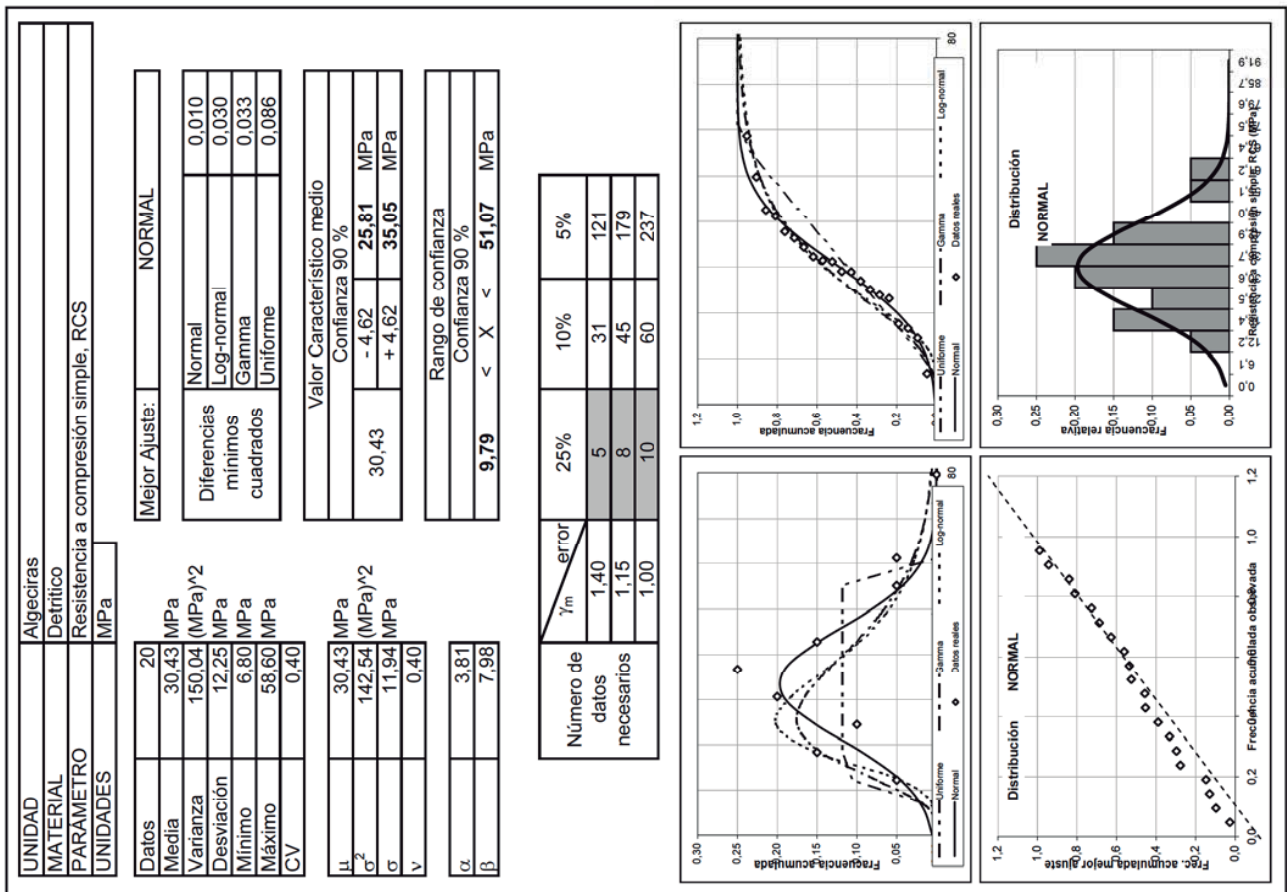
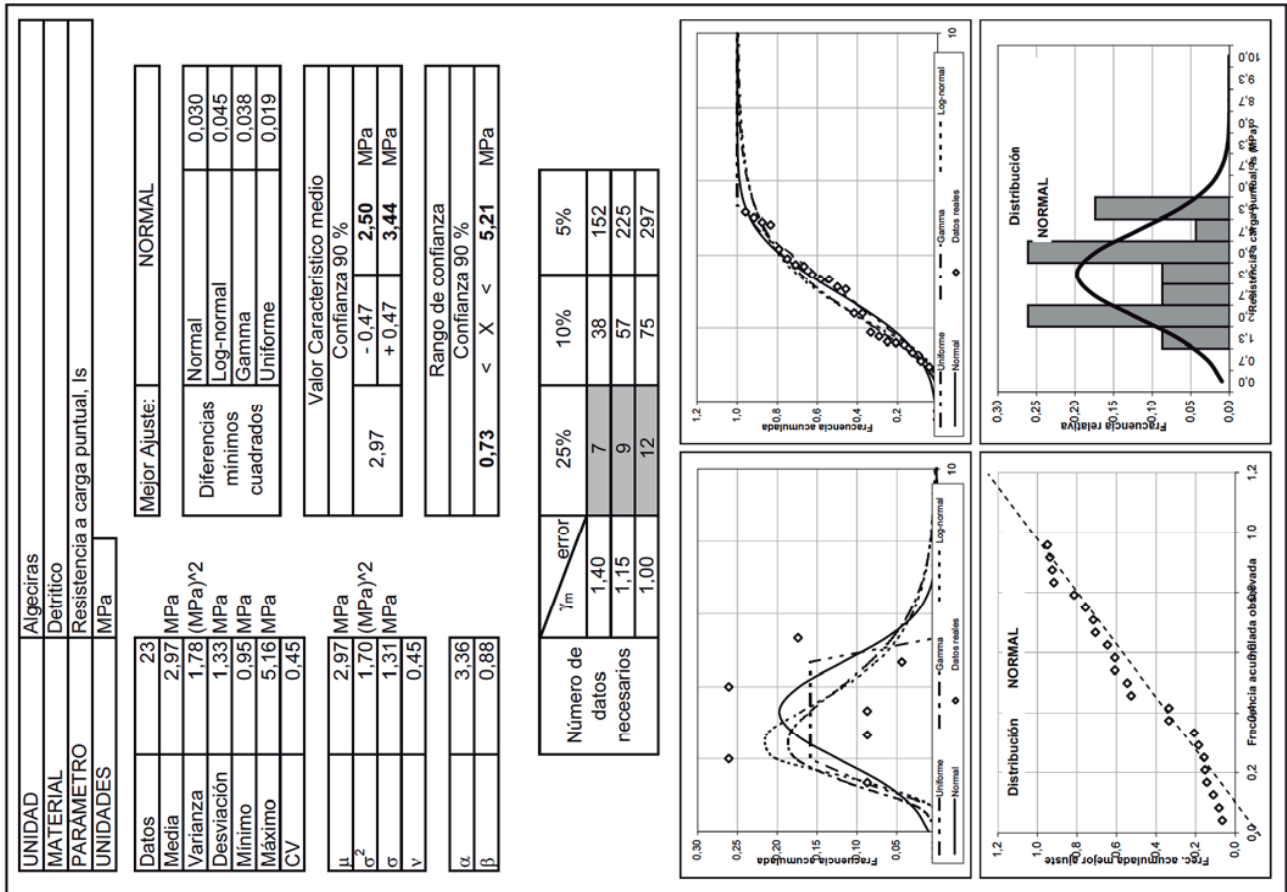


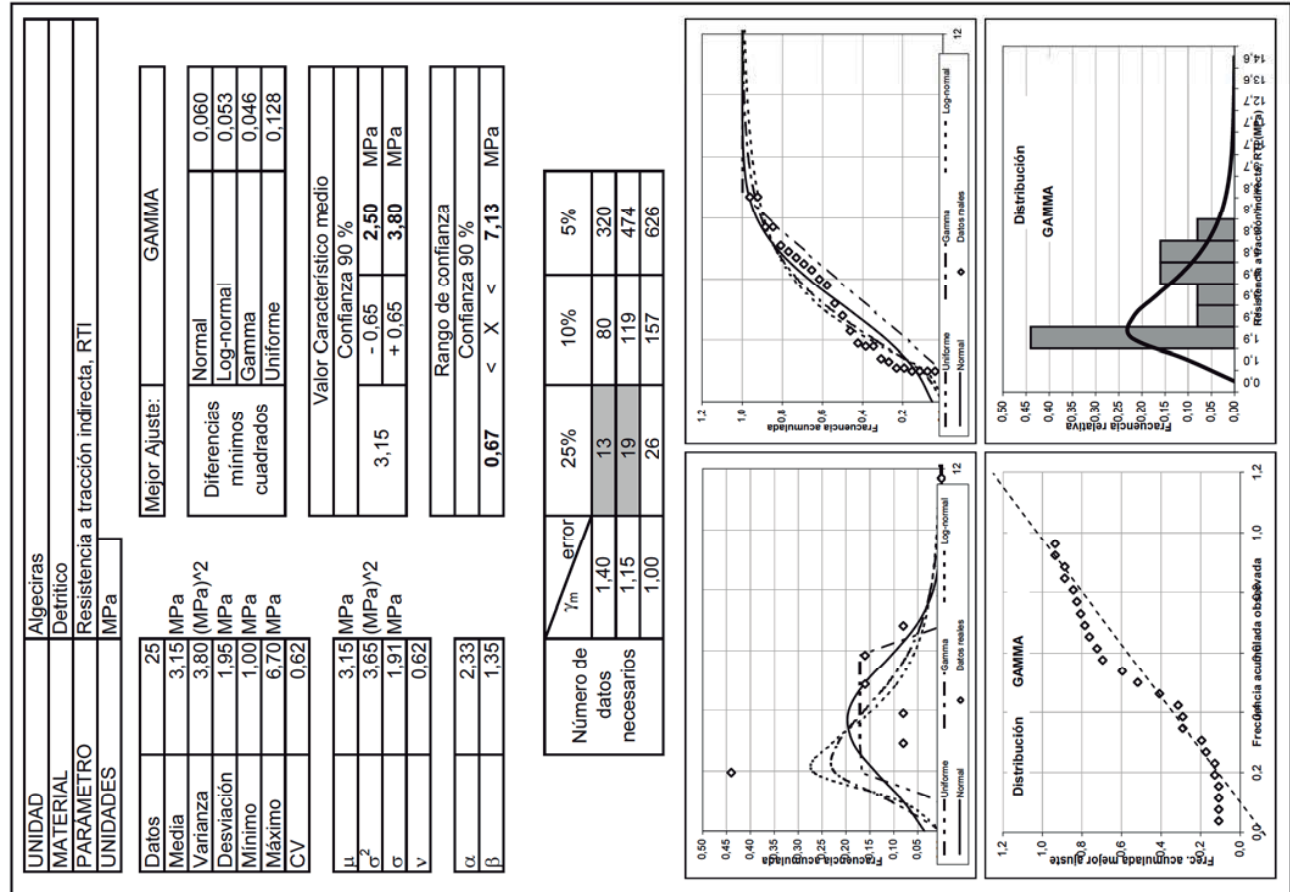
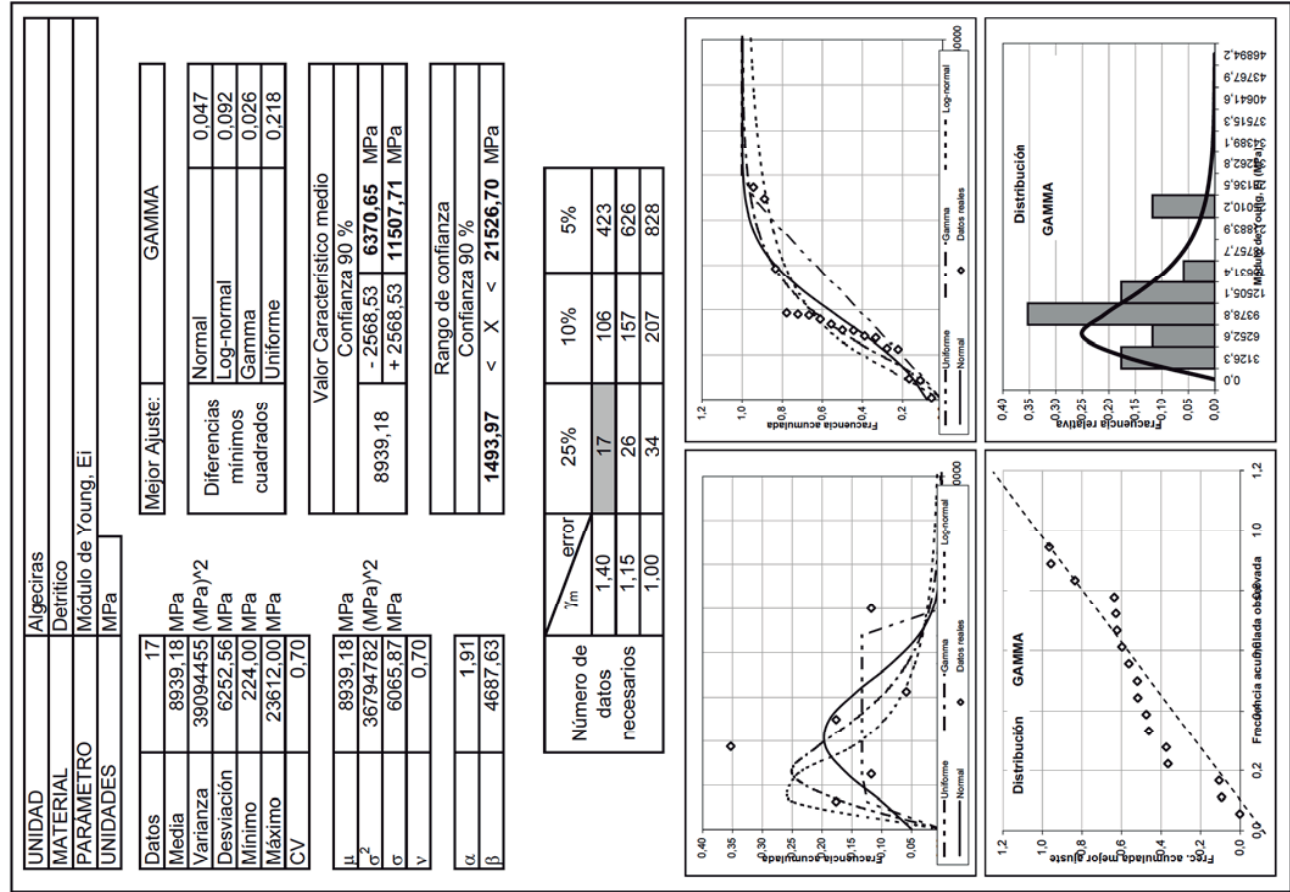




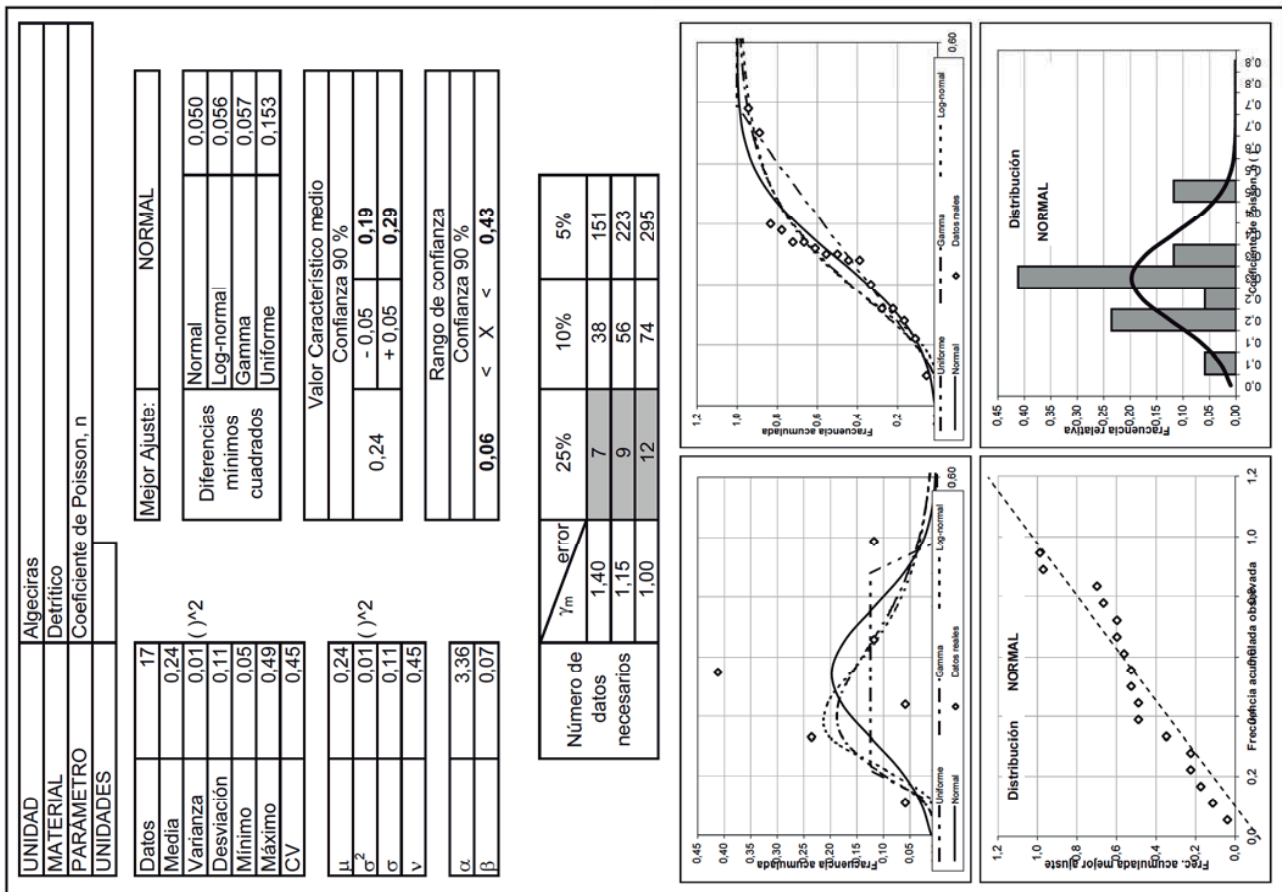
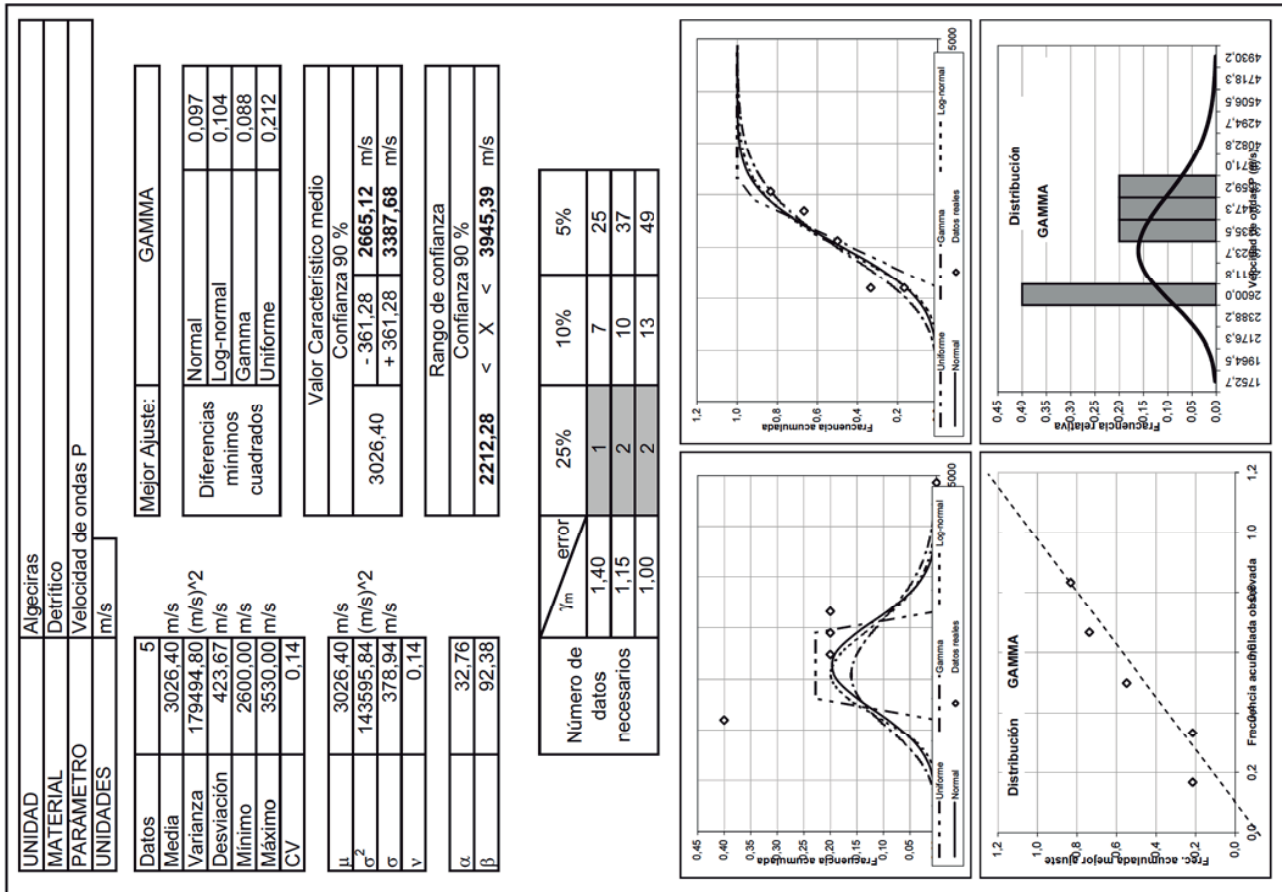


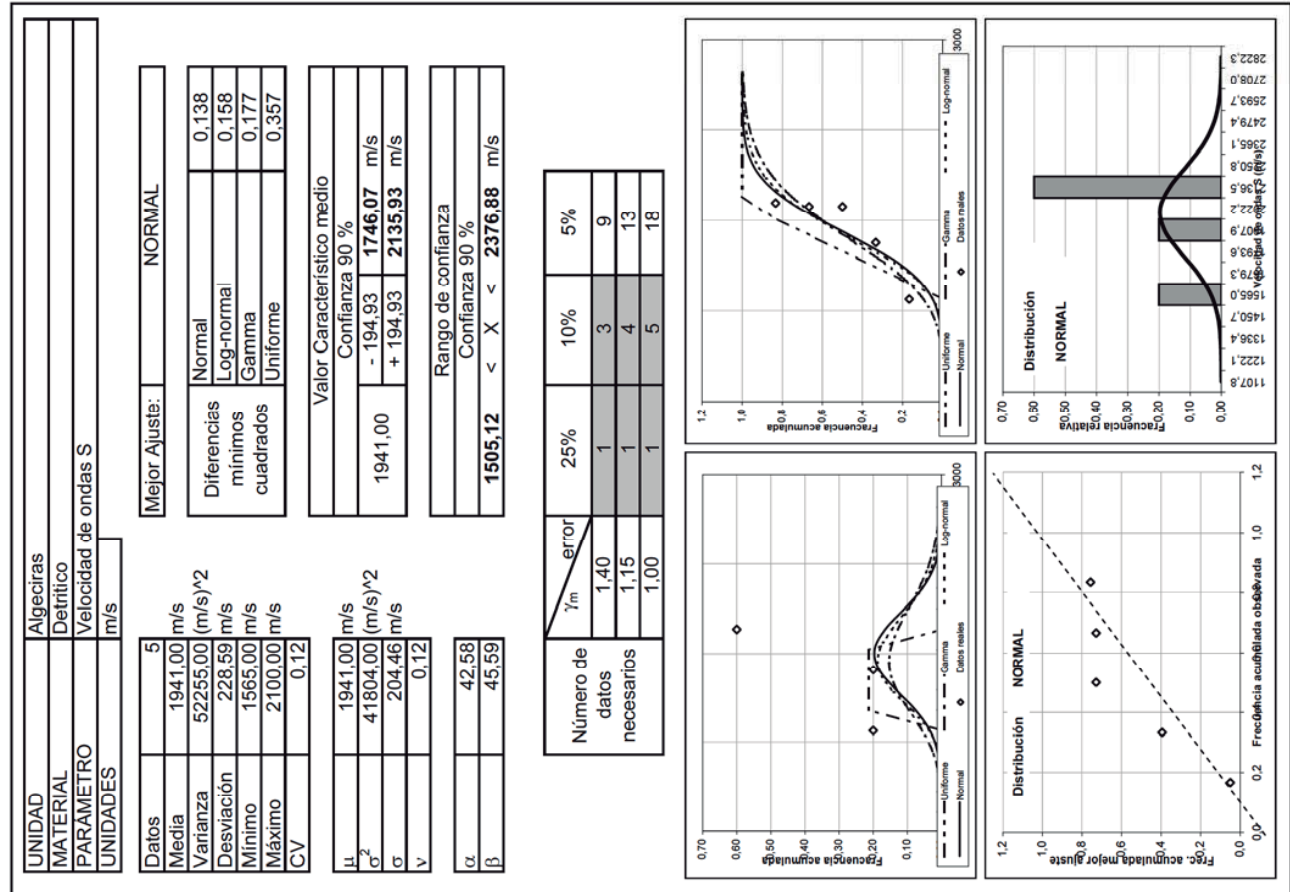
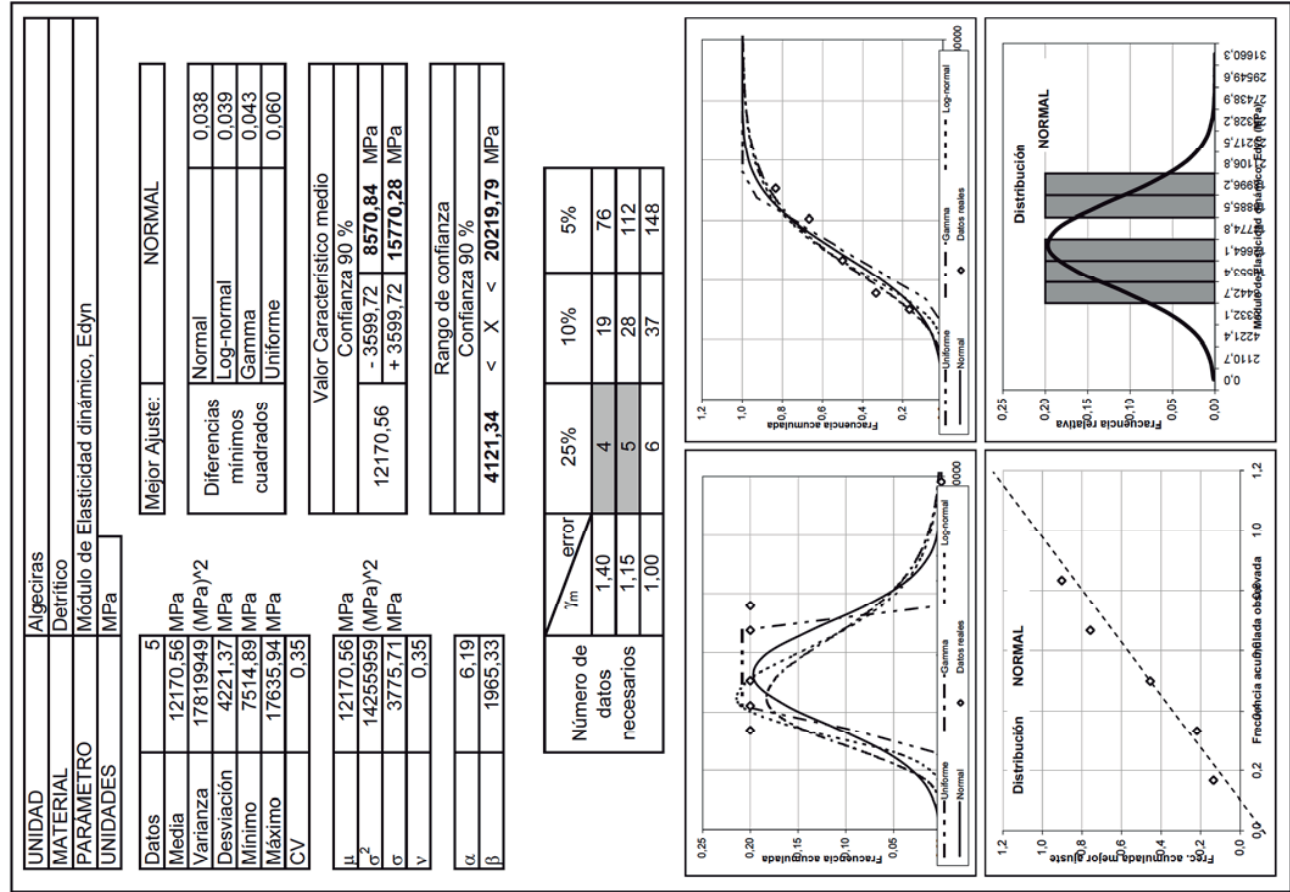


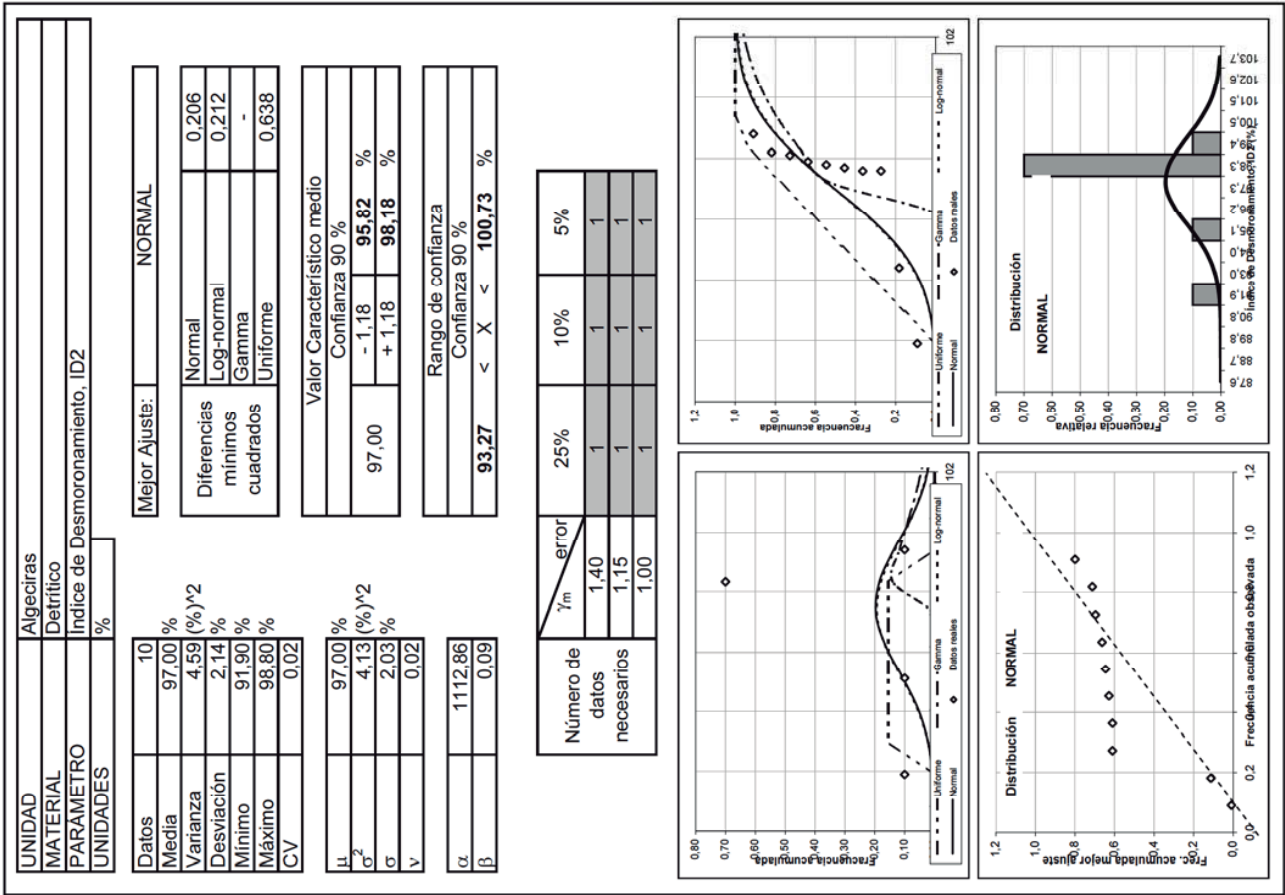












103.7

102.6

101.5

100.5

99.4

98.3

97.2

96.1

95.0

93.9

92.8

91.7

90.6

89.5

88.4

87.3

0.00

0.10

0.20

0.30

0.40

0.50

0.60

0.70

Indice de Desmoronamiento

Unidad de Bolonia



UNIDAD	Bolonia	
MATERIAL	Argilita	
PARAMETRO	Densidad seca in situ, rd	
UNIDADES	kg/m3	

Mejor Ajuste:	
Datos	6
Media	1613,33 kg/m3
Varianza	1187 (kg/m3)^2
Desviación	34,45 kg/m3
Mínimo	1570,00 kg/m3
Máximo	1660,00 kg/m3
CV	0,02

Diferencias mínimos cuadrados	
Normal	
Log-normal	
Gamma	
Uniforme	

Valor Característico medio	
Confianza 90 %	
1613,33	- 15,72 1597,61 kg/m3
	+ 15,72 1629,05 kg/m3

Rango de confianza	

$\mu$	1613,33 kg/m3
$\sigma^2$	989 (kg/m3)^2
$\sigma$	31,45 kg/m3
$v$	0,02

$\alpha$	1322,53
$\beta$	1,22

$\gamma_m$	$\beta/2$	1,00E-03	1,00E-04	1,00E-05
Número de datos necesarios	1,40			
	1,20			
	1,15			

UNIDAD	Bolonia	
MATERIAL	Argilita	
PARAMETRO	Peso específico seco, gd	
UNIDADES	kN/m3	

Mejor Ajuste:		NORMAL	
Datos	21		
Media	17,59 kN/m3		
Varianza	1,07 (kN/m3)^2	Normal	
Desviación	1,04 kN/m3	Log-normal	
Mínimo	14,70 kN/m3	Gamma	
Máximo	18,80 kN/m3	Uniforme	
CV	0,06	0,520	

Diferencias mínimos cuadrados			
Normal			
Log-normal			
Gamma			
Uniforme			

Valor Característico medio			
Confianza 90 %			
17,59	- 0,38 17,21 kN/m3		
	+ 0,38 17,97 kN/m3		

Rango de confianza			
Confianza 90 %			
15,85	< X < 19,33 kN/m3		

$\mu$	17,59 kN/m3
$\sigma^2$	1 (kN/m3)^2
$\sigma$	1,01 kN/m3
$v$	0,06

$\alpha$	142,29
$\beta$	0,12

$\gamma_m$	error	25%	10%	5%
Número de datos necesarios	1,40	1	1	3
	1,15	1	1	4
	1,00	1	2	6

UNIDAD	Bolonia
MATERIAL	Argilita
PARAMETRO	Resistencia a compresión simple, RCS
UNIDADES	MPa

Datos	6	Mejor Ajuste:	
Media	87,18 MPa		
Varianza	521 (MPa) <sup>2</sup>		Normal
Desviación	22,83 MPa		Log-normal
Mínimo	51,10 MPa		Gamma
Máximo	122,30 MPa		Uniforme
CV	0,26		

$\mu$	87,18 MPa	Valor Característico medio
$\sigma^2$	434 (MPa) <sup>2</sup>	Confianza 90 %
$\sigma$	20,84 MPa	- 10,42    76,76    MPa
$v$	0,26	+ 10,42    97,60    MPa

$\alpha$	9,10	Rango de confianza
$\beta$	9,58	

Número de datos necesarios	$\gamma_m$	$\beta/2$	1,00E-03	1,00E-04	1,00E-05
	1,40	1,40			
	1,15	1,20			
		1,15			

UNIDAD	Bolonia
MATERIAL	Argilita
PARAMETRO	Índice de plasticidad, IP
UNIDADES	

Datos	30	Mejor Ajuste:	GAMMA
Media	36,27		
Varianza	173,23 ( ) <sup>2</sup>		Normal
Desviación	13,16		Log-normal
Mínimo	20,10		Gamma
Máximo	65,10		Uniforme
CV	0,36		

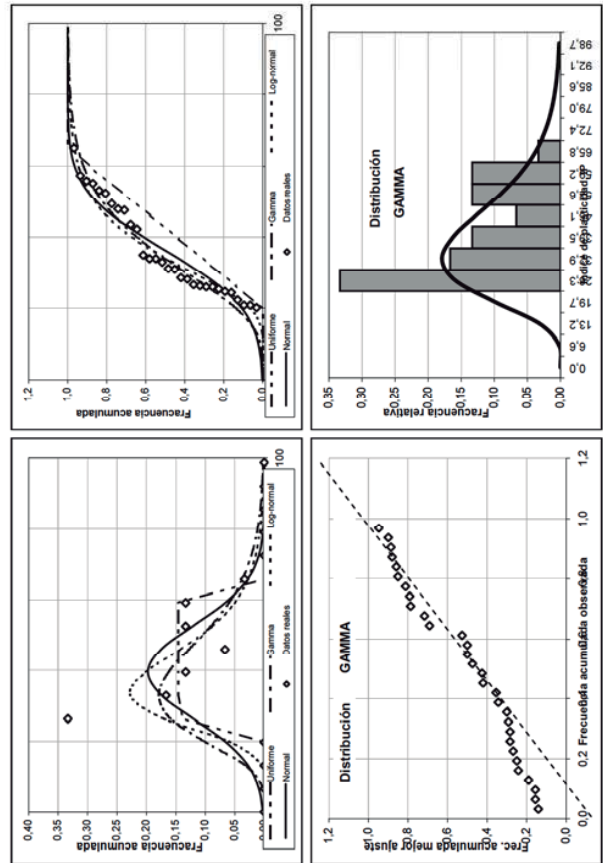
$\mu$	36,27	Valor Característico medio
$\sigma^2$	167 ( ) <sup>2</sup>	Confianza 90 %
$\sigma$	12,94	- 4,01    32,26
$v$	0,36	+ 4,01    40,28

$\alpha$	5,23	Rango de confianza
$\beta$	6,93	Confianza 90 %

Número de datos necesarios	$\gamma_m$ error	25%	10%	5%
	1,40	5	28	109
	1,15	7	41	162
	1,00	9	54	213



UNIDAD	Bolonia	
MATERIAL	Argilita	
PARAMETRO	Módulo de deformación con placa de carga, Ecp	
UNIDADES	MPa	

Mejor Ajuste:	
Datos	6
Media	30,50 MPa
Varianza	839 (MPa) <sup>2</sup>
Desviación	28,96 MPa
Mínimo	14,00 MPa
Máximo	89,00 MPa
CV	0,95

Diferencias mínimos cuadrados	
Normal	
Log-normal	
Gamma	
Uniforme	

Valor Característico medio	
Confianza 90 %	
30,50	- 13,22    17,28    MPa
	+ 13,22    43,72    MPa

Rango de confianza	

α	2,18
β	14,02

Número de datos necesarios	
γ <sub>m</sub>	β/2
1,40	1,40
1,15	1,20
	1,15
	1,00E-03
	1,00E-04
	1,00E-05

UNIDAD	Bolonia	
MATERIAL	Argilita	
PARAMETRO	Resistencia a la carga puntual, Is50	
UNIDADES	MPa	

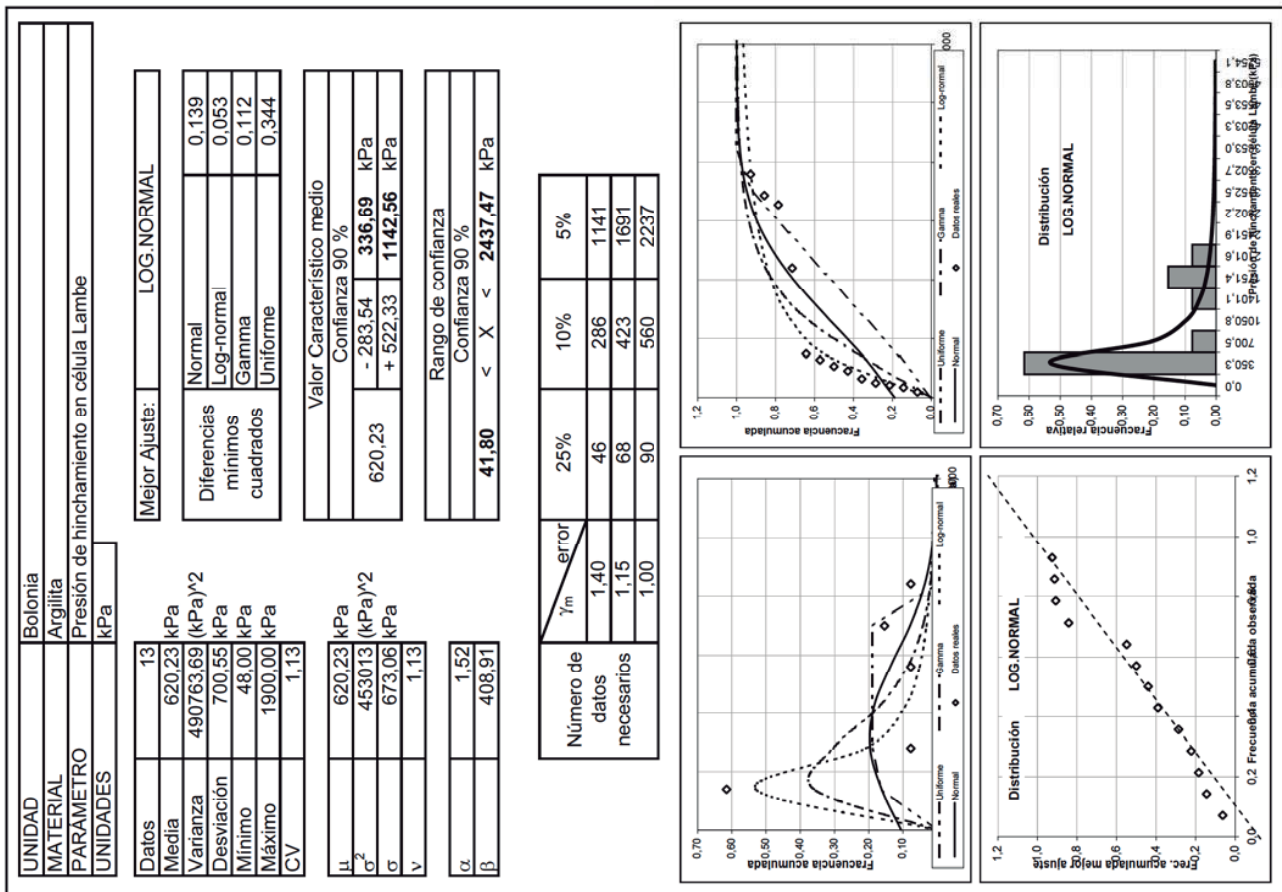
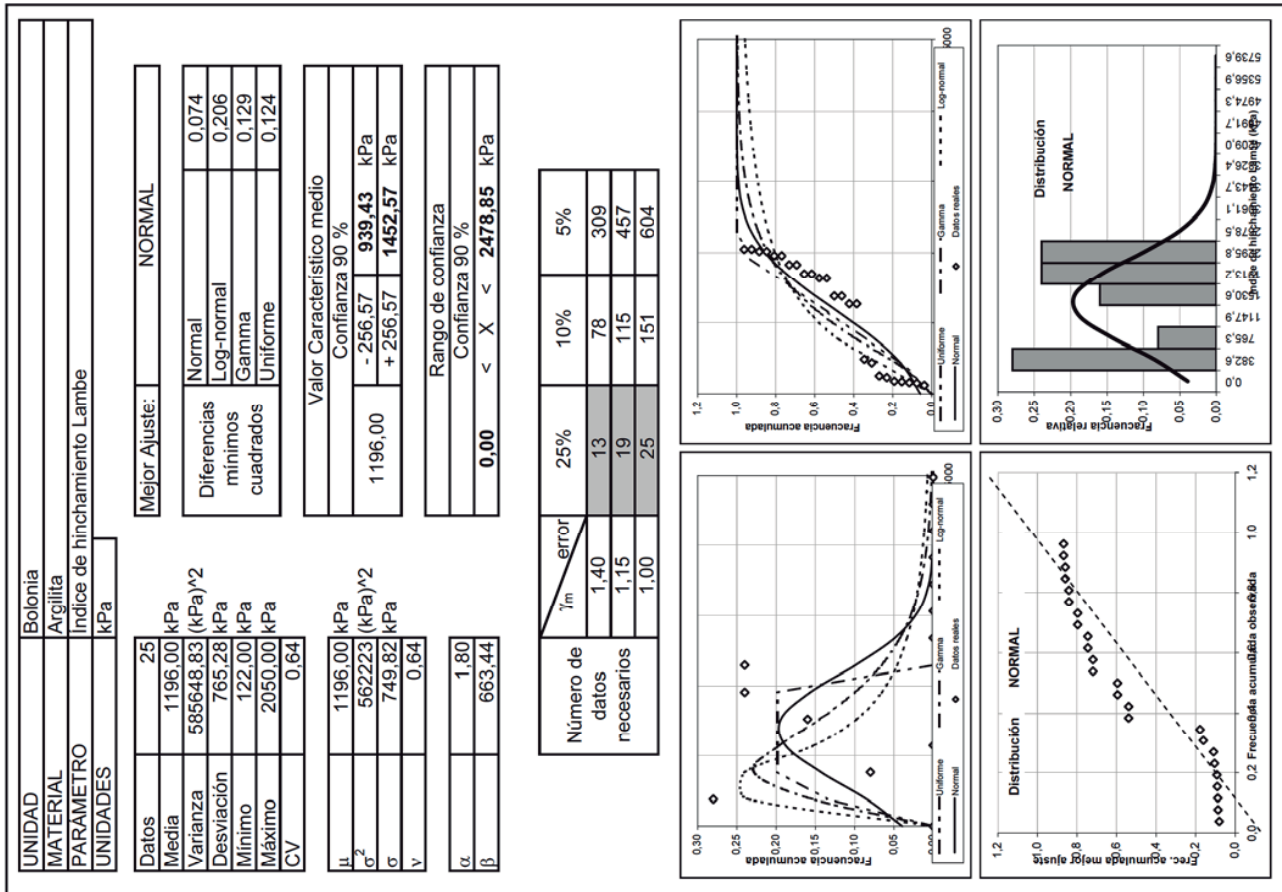
Mejor Ajuste:	
Datos	33
Media	0,99 MPa
Varianza	1,66 (MPa) <sup>2</sup>
Desviación	1,29 MPa
Mínimo	0,03 MPa
Máximo	5,70 MPa
CV	1,29

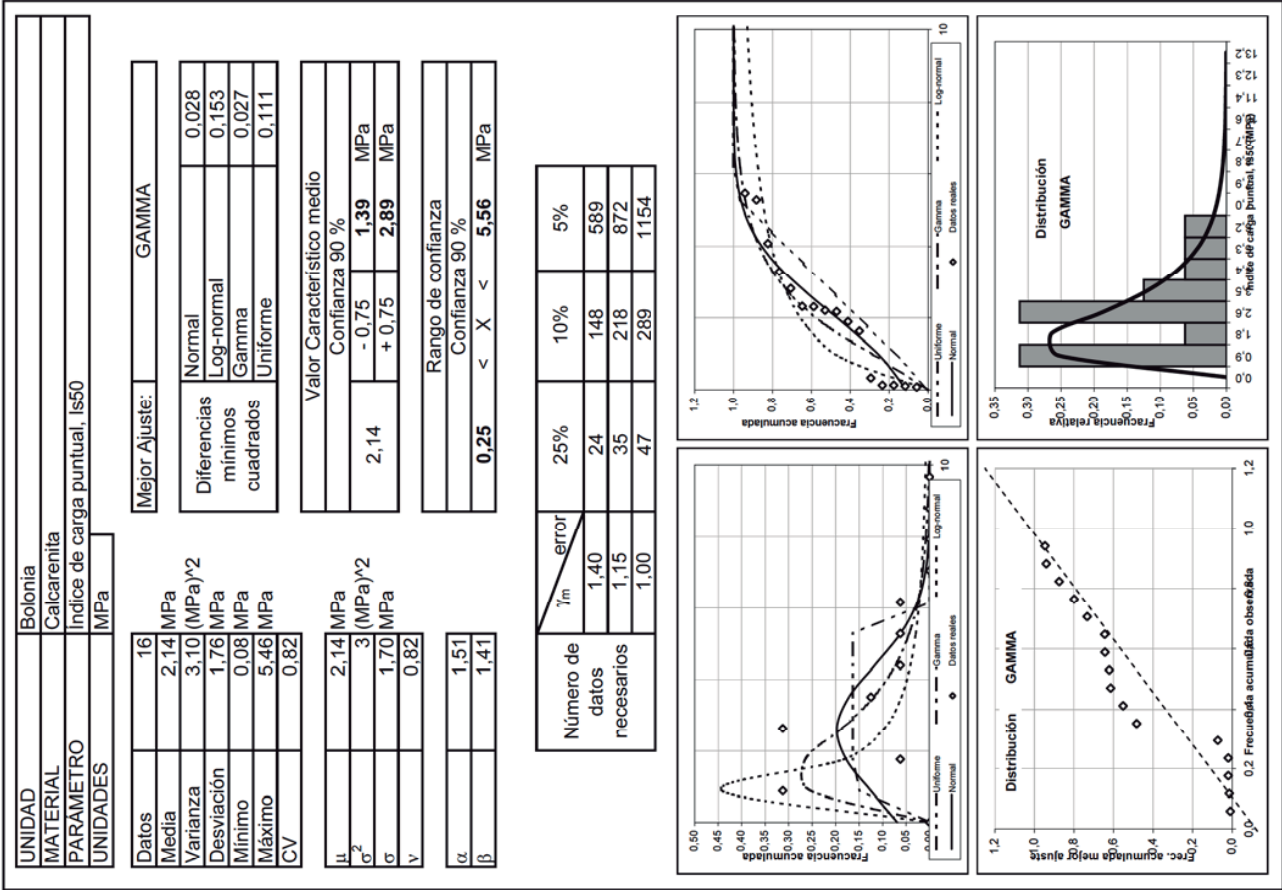
Diferencias mínimos cuadrados	
Normal	
Log-normal	
Gamma	
Uniforme	
1,140	

Valor Característico medio	
Confianza 90 %	
0,99	- 0,36    0,63    MPa
	+ 0,56    1,55    MPa

Rango de confianza	
Confianza 90 %	
0,03	< X < 5,10    MPa

Número de datos necesarios	
γ <sub>m</sub>	error
1,40	25%
1,15	10%
1,00	5%
	51
	319
	1274
	76
	472
	1887
	100
	624
	2496





UNIDAD	Bolonia
MATERIAL	Limolita
PARAMETRO	Indice de plasticidad, IP
UNIDADES	

Datos	6
Media	18,63
Varianza	9 ( ) <sup>2</sup>
Desviación	2,96
Mínimo	16,30
Máximo	23,70
CV	0,16

Mejor Ajuste:	
Diferencias mínimos cuadrados	Normal
	Log-normal
	Gamma
	Uniforme

Valor Característico medio	
Confianza 90 %	
18,63	- 1,35 <b>17,28</b>
	+ 1,35 <b>19,98</b>

Rango de confianza	

$\mu$	18,63
$\sigma^2$	7 ( ) <sup>2</sup>
$\sigma$	2,70
$v$	0,16
$\alpha$	26,54
$\beta$	0,70

Número de datos necesarios	$\gamma_m$ $\beta/2$	1,00E-03	1,00E-04	1,00E-05
		1,40		
		1,20		
		1,15		

UNIDAD	Bolonia
MATERIAL	Limolita
PARAMETRO	Peso específico seco, gd
UNIDADES	kN/m <sup>3</sup>

Datos	9
Media	20,42 kN/m <sup>3</sup>
Varianza	1 (kN/m <sup>3</sup> ) <sup>2</sup>
Desviación	1,17 kN/m <sup>3</sup>
Mínimo	19,00 kN/m <sup>3</sup>
Máximo	21,90 kN/m <sup>3</sup>
CV	0,06

Mejor Ajuste:	
Diferencias mínimos cuadrados	Normal
	Log-normal
	Gamma
	Uniforme

Valor Característico medio	
Confianza 90 %	
20,42	- 0,55 <b>19,87</b> kN/m <sup>3</sup>
	+ 0,55 <b>20,97</b> kN/m <sup>3</sup>

Rango de confianza	

$\mu$	20,42 kN/m <sup>3</sup>
$\sigma^2$	1 (kN/m <sup>3</sup> ) <sup>2</sup>
$\sigma$	1,11 kN/m <sup>3</sup>
$v$	0,06
$\alpha$	171,96
$\beta$	0,12

Número de datos necesarios	$\gamma_m$ $\beta/2$	1,00E-03	1,00E-04	1,00E-05
		1,40		
		1,20		
		1,15		

UNIDAD	Bolonia
MATERIAL	Limolita
PARAMETRO	Módulo de deformación con placa de carga, Epc
UNIDADES	MPa

Datos	6	Mejor Ajuste:	
Media	434.50 MPa		
Varianza	16057 (MPa) <sup>2</sup>		
Desviación	126.72 MPa	Diferencias mínimas	Normal
Mínimo	281.00 MPa	cuadrados	Log-normal
Máximo	643.00 MPa		Gamma
CV	0.29		Uniforme

Valor Característico medio		
Confianza 90 %		
434.50	- 57.84	376.66 MPa
	+ 57.84	492.34 MPa

Rango de confianza		

μ	434.50 MPa
σ <sup>2</sup>	13381 (MPa) <sup>2</sup>
σ	115.68 MPa
v	0.29
α	8.38
β	51.84

Número de datos necesarios	γ <sub>m</sub>	β/2	1,00E-03	1,00E-04	1,00E-05
		1.40			
		1.20			
		1.15			

UNIDAD	Bolonia
MATERIAL	Limolita
PARAMETRO	Densidad seca in situ, rd
UNIDADES	kg/m3

Datos	6	Mejor Ajuste:	
Media	1535.00 kg/m3		
Varianza	11630 (kg/m3) <sup>2</sup>		
Desviación	107.84 kg/m3	Diferencias mínimas	Normal
Mínimo	1450.00 kg/m3	cuadrados	Log-normal
Máximo	1710.00 kg/m3		Gamma
CV	0.07		Uniforme

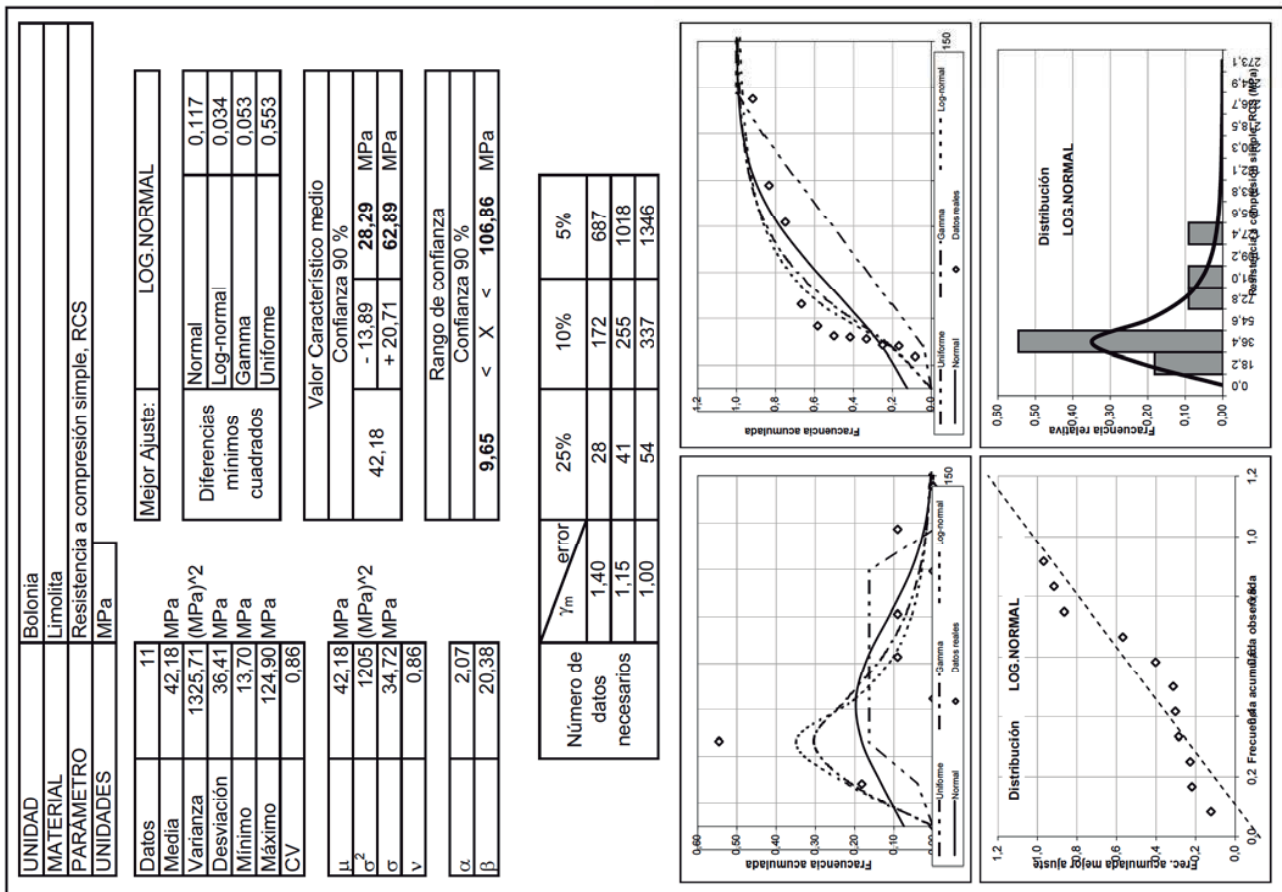
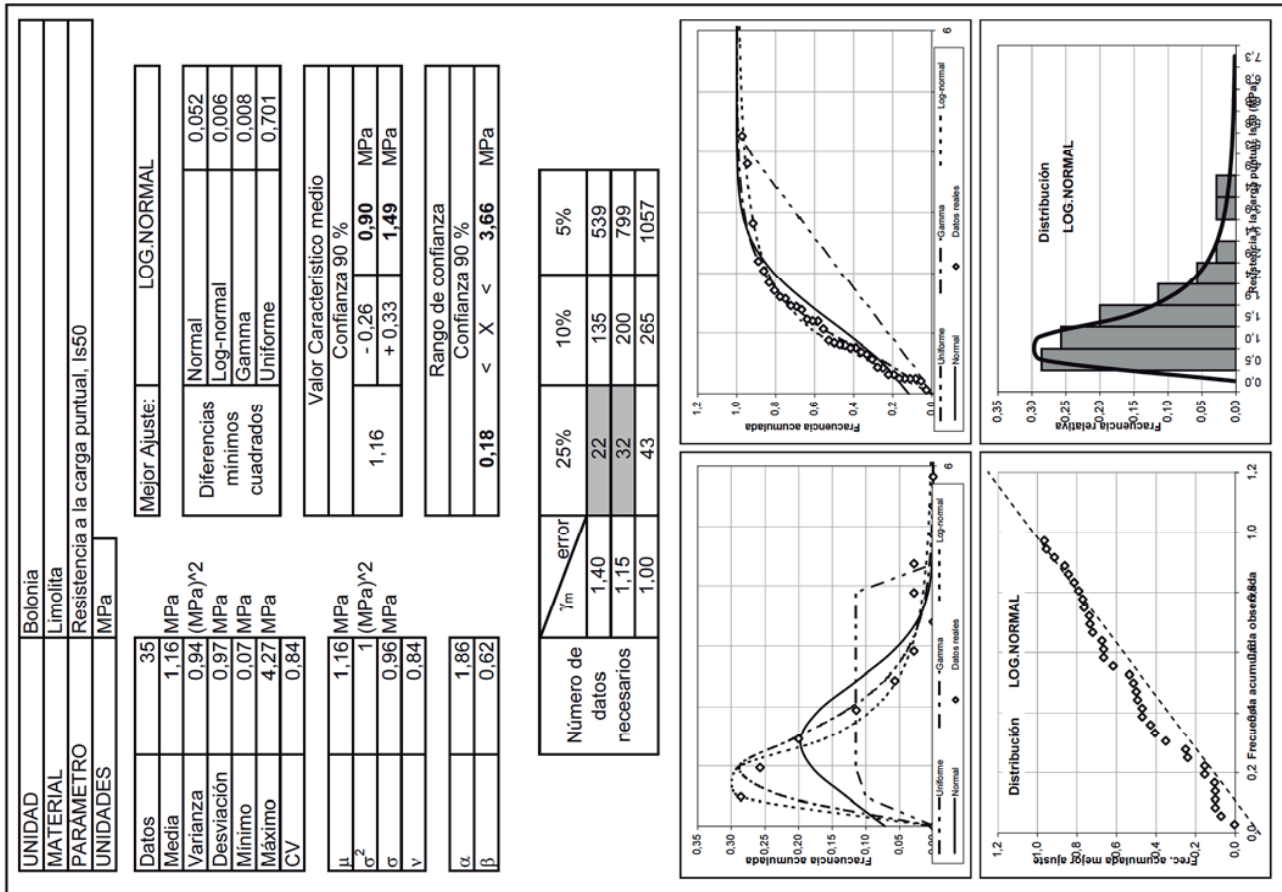
Valor Característico medio		
Confianza 90 %		
1535.00	- 49.22	1485.78 kg/m3
	+ 49.22	1584.22 kg/m3

Rango de confianza		

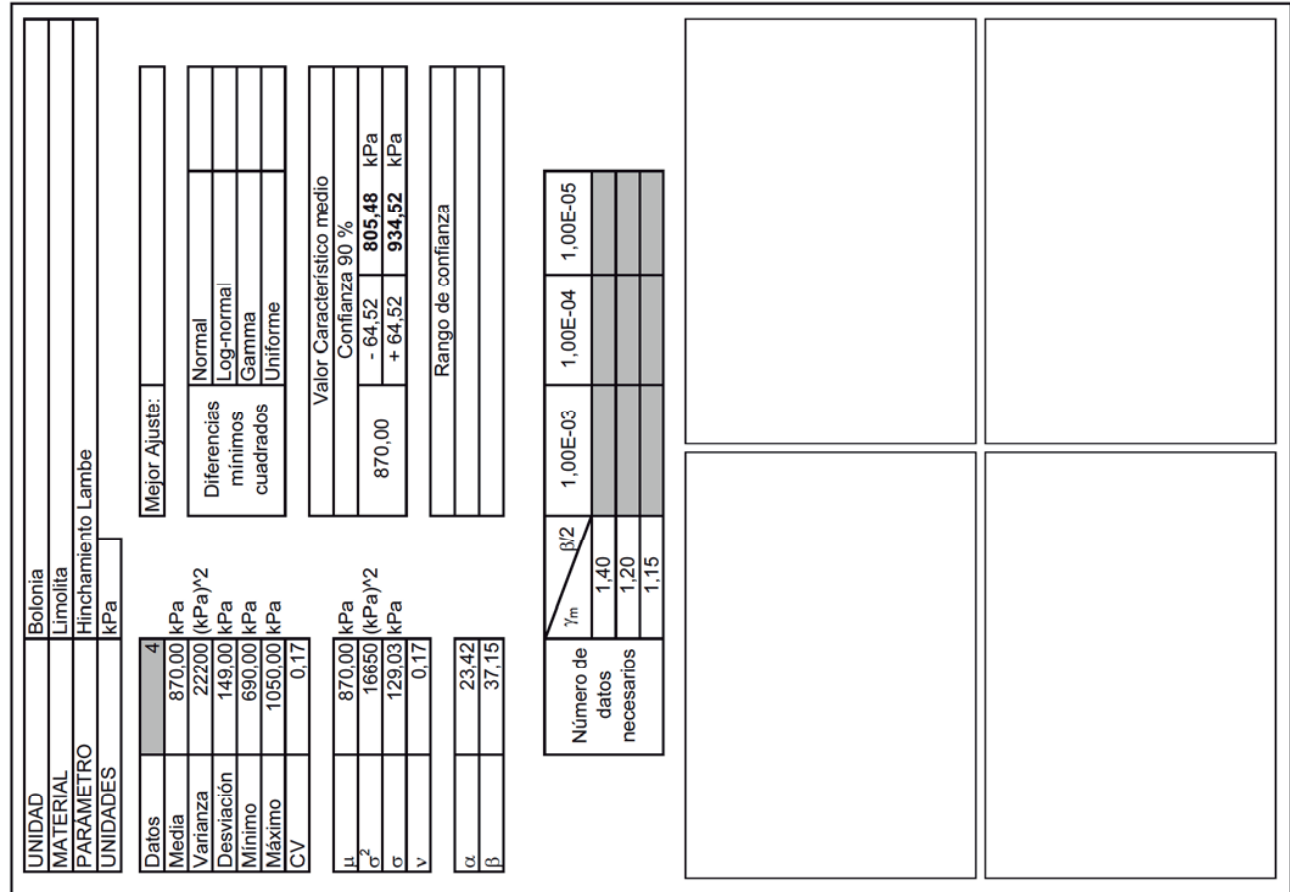
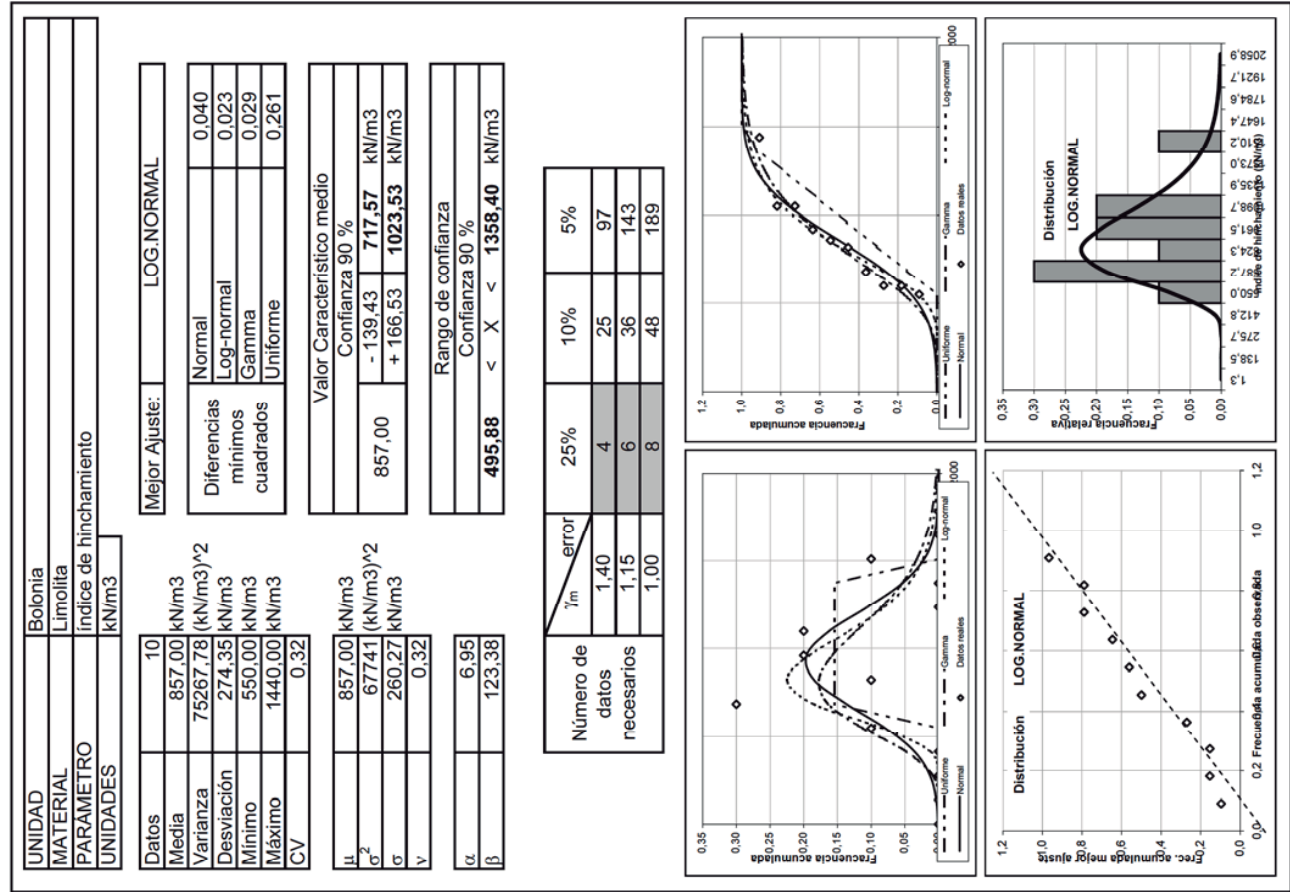
μ	1535.00 kg/m3
σ <sup>2</sup>	9692 (kg/m3) <sup>2</sup>
σ	98.45 kg/m3
v	0.07
α	126.28
β	12.16

Número de datos necesarios	γ <sub>m</sub>	β/2	1,00E-03	1,00E-04	1,00E-05
		1.40			
		1.20			
		1.15			

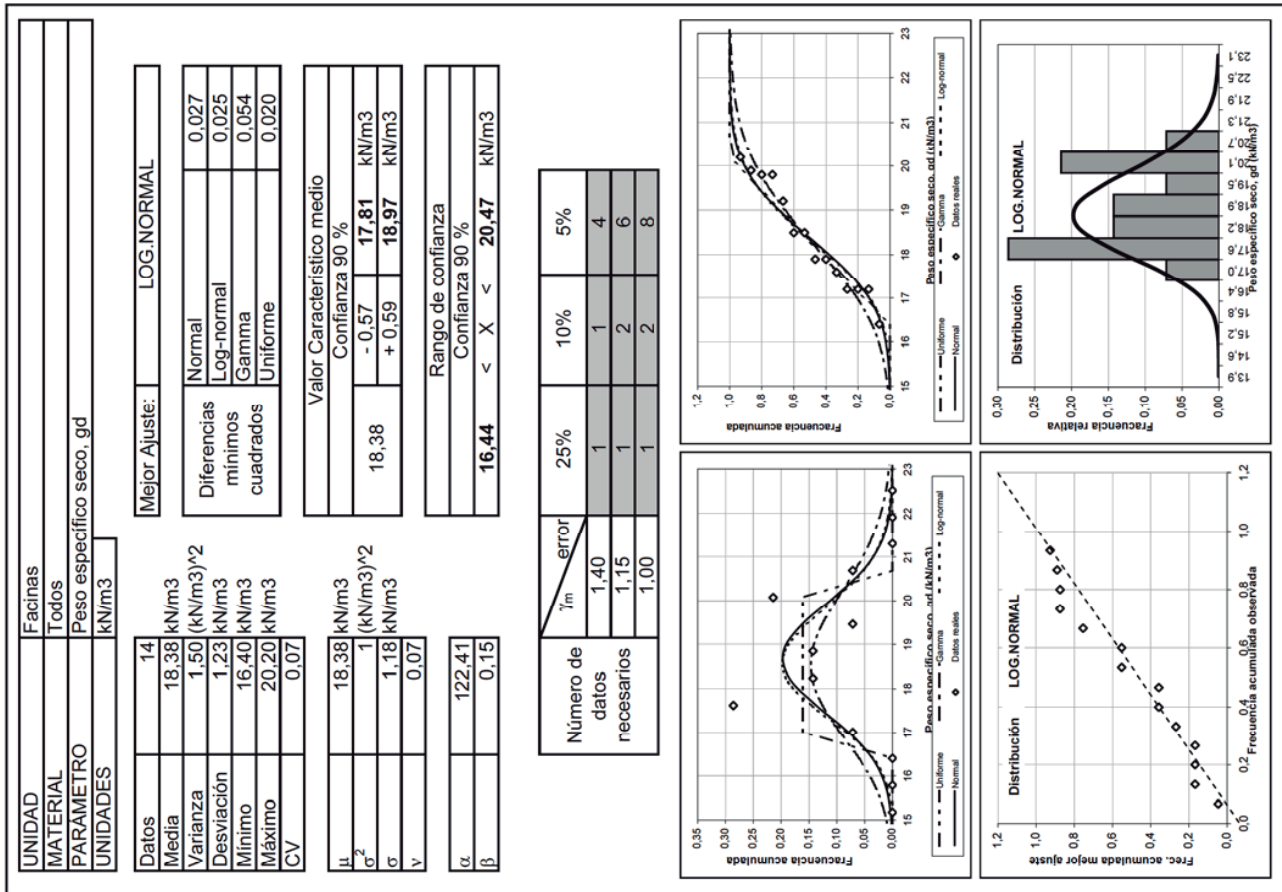


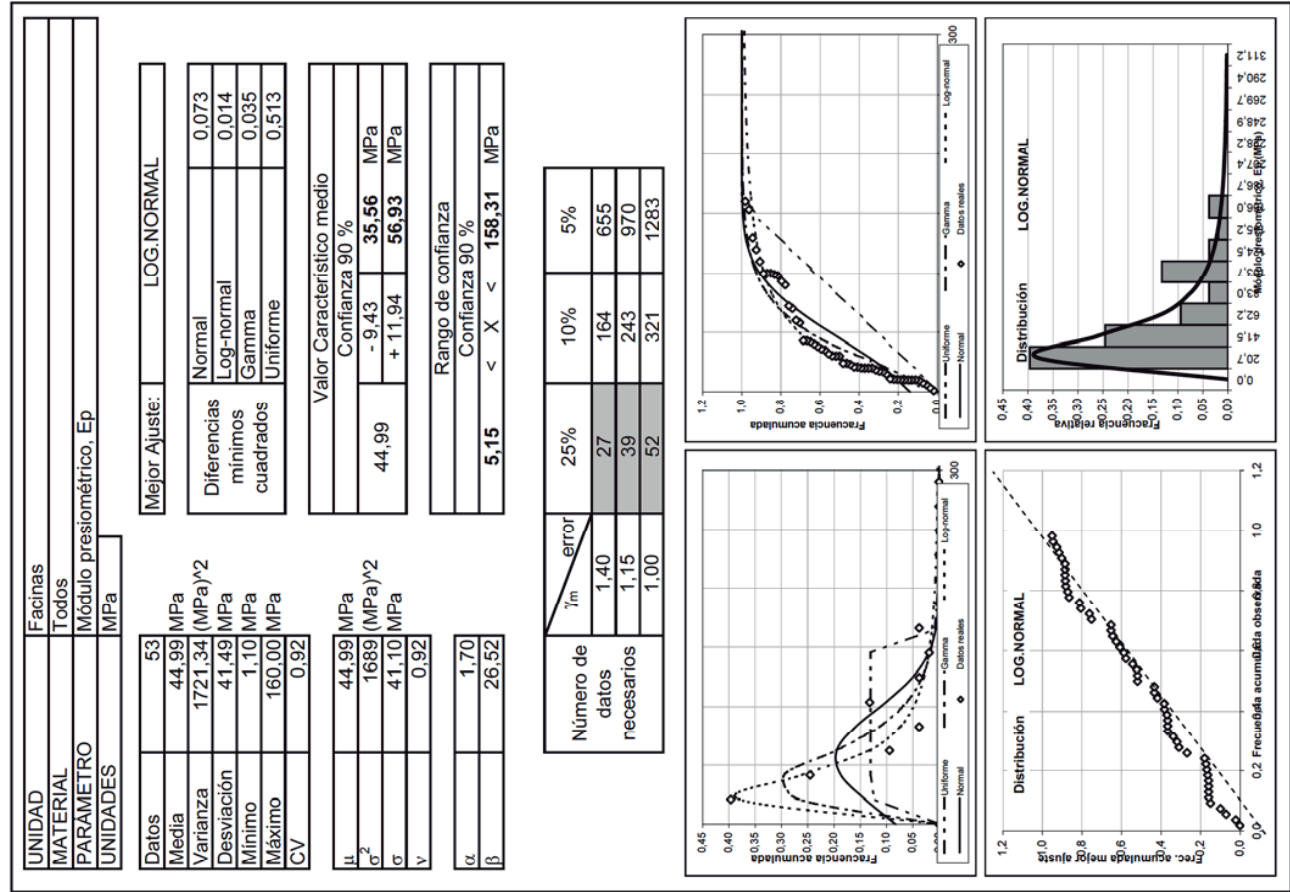






# Unidad de Facinas





UNIDAD	Facinas	
MATERIAL	Todos	
PARAMETRO	Indice de entumecimiento, Cs	
UNIDADES		

Datos	5
Media	0,16
Varianza	
Desviación	0 ( ) <sup>2</sup>
Mínimo	0,07
Máximo	0,24
CV	0,41

Mejor Ajuste:	
Diferencias mínimos cuadrados	Normal
	Log-normal
	Gamma
	Uniforme

Valor Característico medio	
Confianza 90 %	
0,16	- 0,03 <b>0,13</b>
	+ 0,03 <b>0,19</b>

Rango de confianza	

$\mu$	0,16
$\sigma^2$	0 ( ) <sup>2</sup>
$\sigma$	0,06
$v$	0,41

$\alpha$	4,18
$\beta$	0,04

Número de datos necesarios	$\gamma_m$ error			
	25%	10%	5%	
	0,00			
	0,00			

UNIDAD	Facinas	
MATERIAL	Todos	
PARAMETRO	Indice de compresibilidad, Cv	
UNIDADES		

Datos	5
Media	0,36
Varianza	
Desviación	0 ( ) <sup>2</sup>
Mínimo	0,23
Máximo	0,63
CV	0,62

Mejor Ajuste:	
Diferencias mínimos cuadrados	Normal
	Log-normal
	Gamma
	Uniforme

Valor Característico medio	
Confianza 90 %	
0,36	- 0,1 <b>0,26</b>
	+ 0,1 <b>0,46</b>

Rango de confianza	

$\mu$	0,36
$\sigma^2$	0 ( ) <sup>2</sup>
$\sigma$	0,20
$v$	0,62

$\alpha$	2,74
$\beta$	0,13

Número de datos necesarios	$\gamma_m$ error			
	25%	10%	5%	
	0,00			
	0,00			

UNIDAD	Facinas
MATERIAL	Todos
PARAMETRO	Presión de hinchamiento, Ph
UNIDADES	kPa

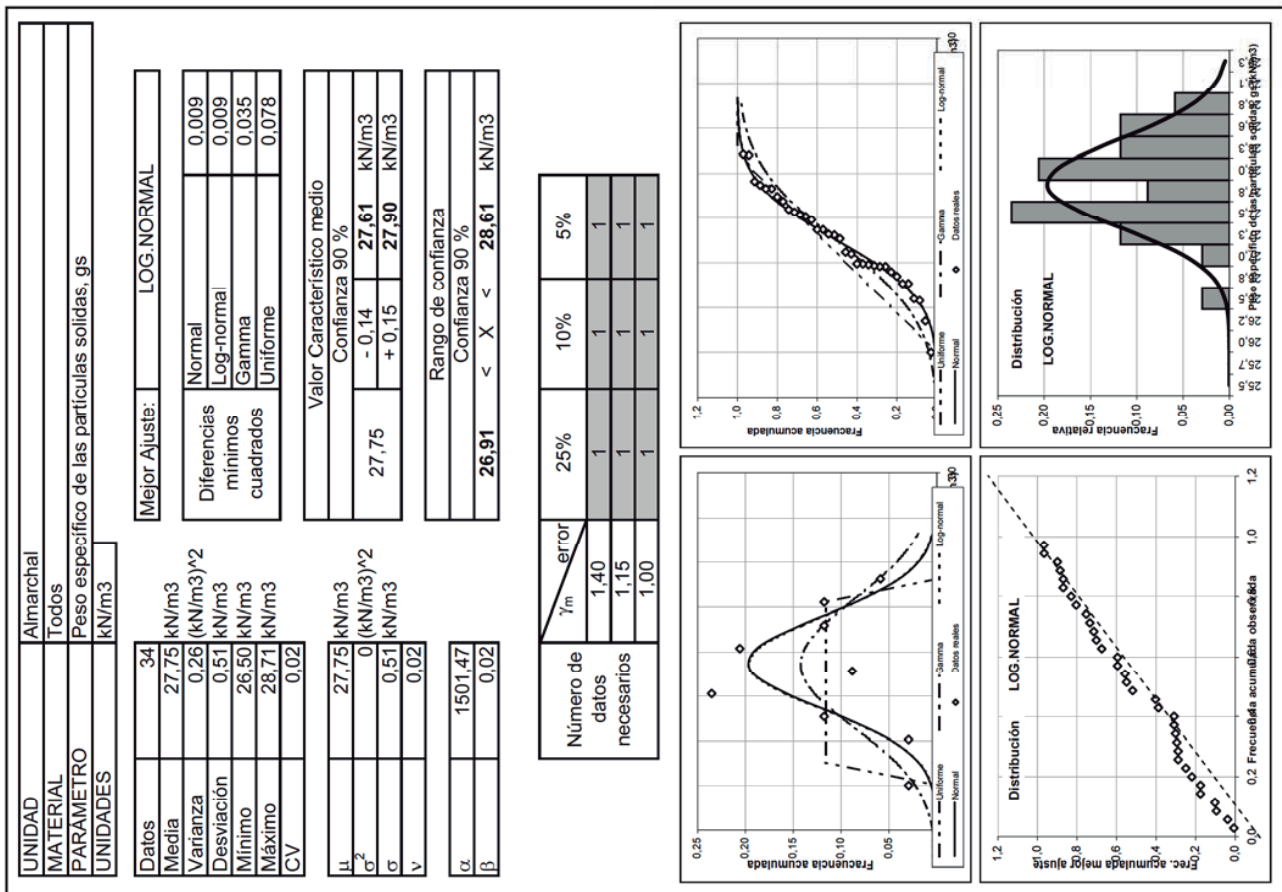
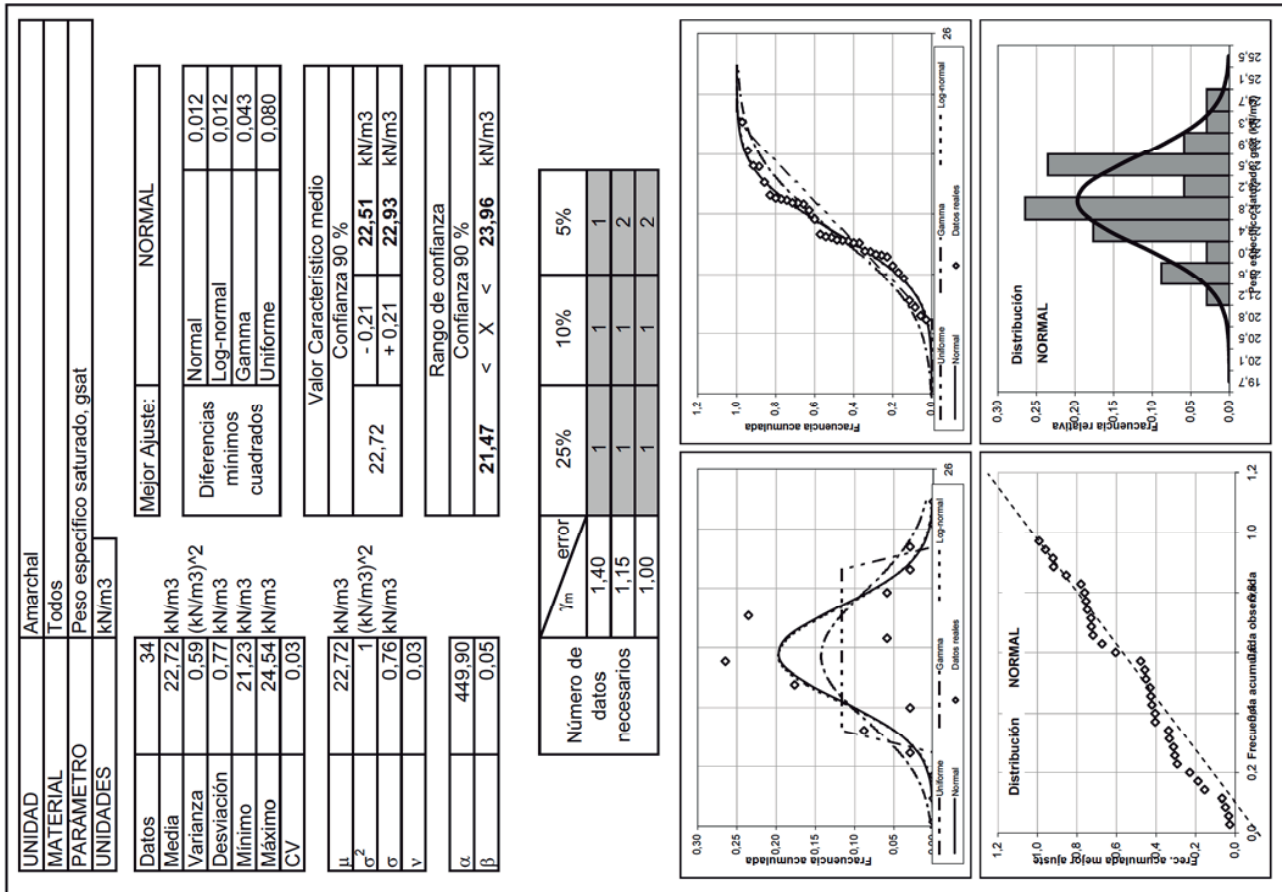
Datos	5	Mejor Ajuste:	
Media	624.00 kPa		
Varianza	16380 (kPa) <sup>2</sup>	Normal	
Desviación	127.98 kPa	Log-normal	
Mínimo	450.00 kPa	Gamma	
Máximo	800.00 kPa	Uniforme	
CV	0.21		

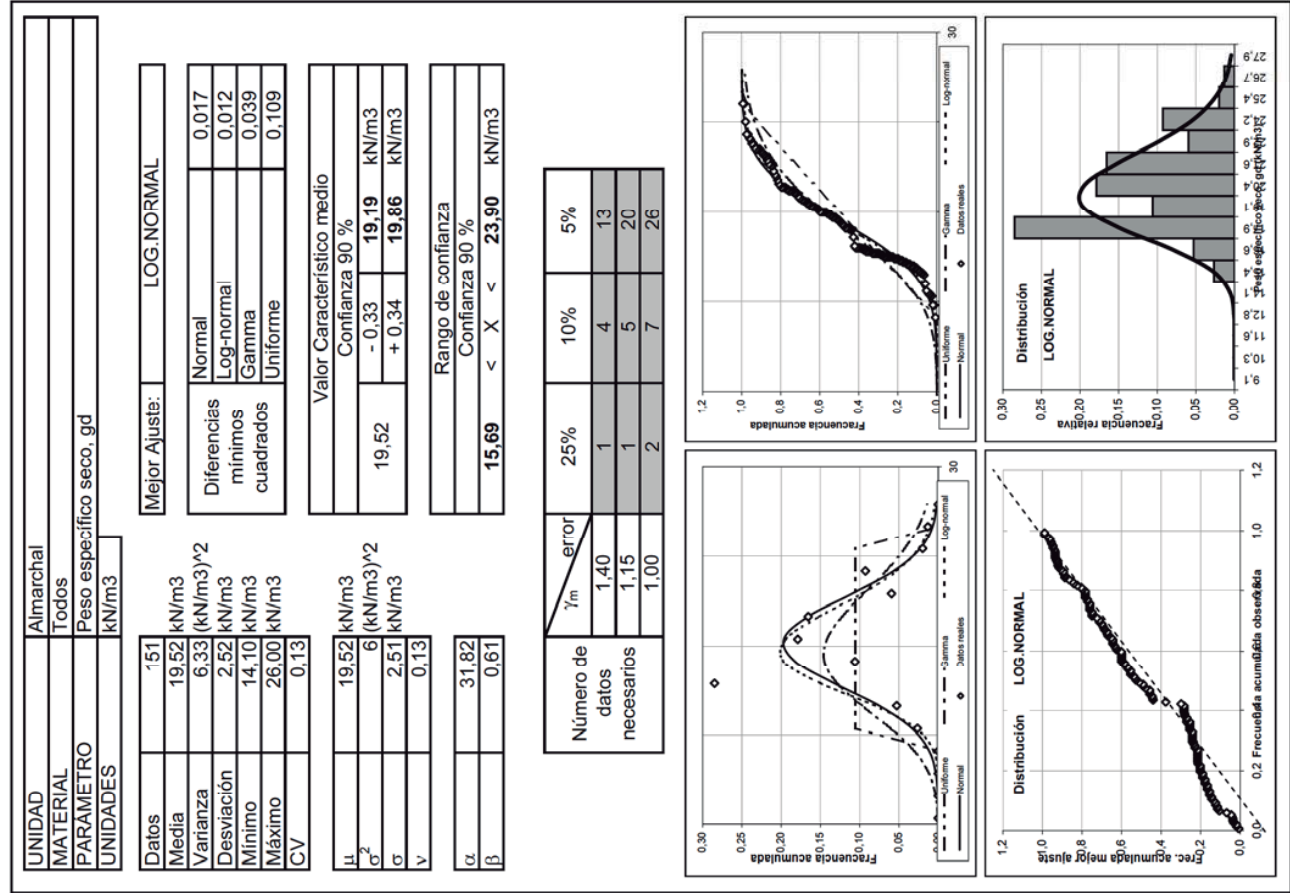
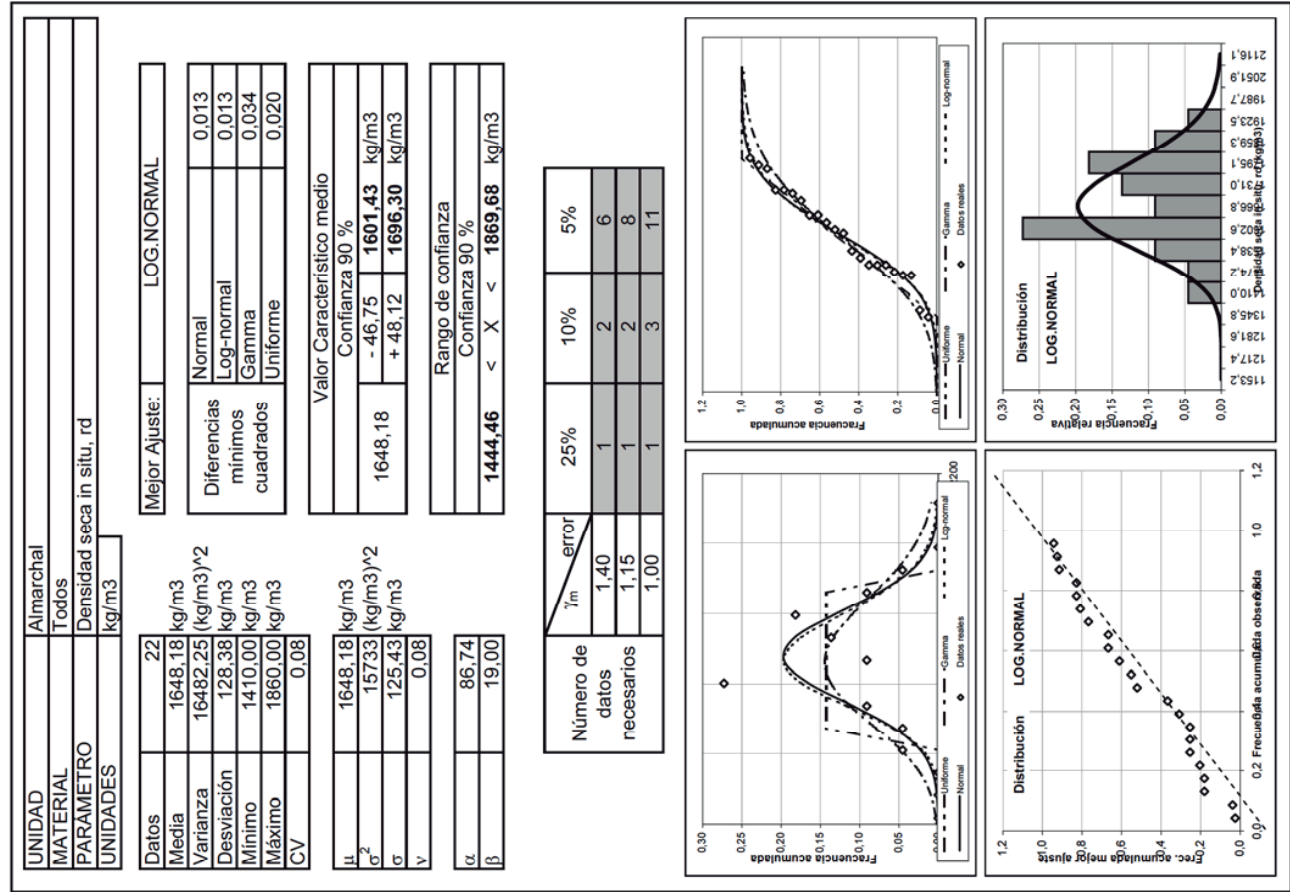
μ	624.00 kPa	Valor Característico medio
σ <sup>2</sup>	13.104 (kPa) <sup>2</sup>	Confianza 90 %
σ	114.47 kPa	- 57.24    566.76    kPa
v	0.21	+ 57.24    681.24    kPa
α	15.48	
β	40.30	

Rango de confianza				

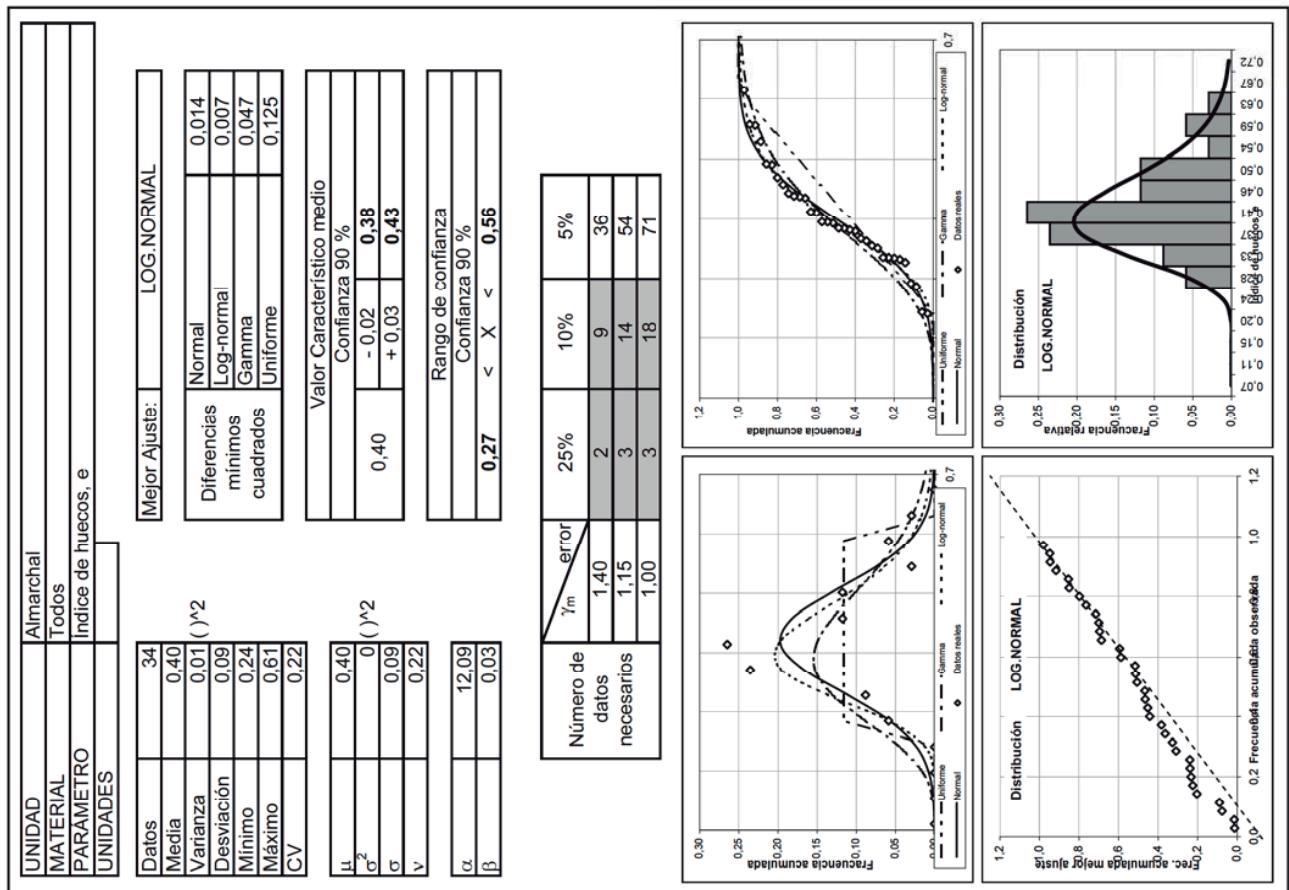
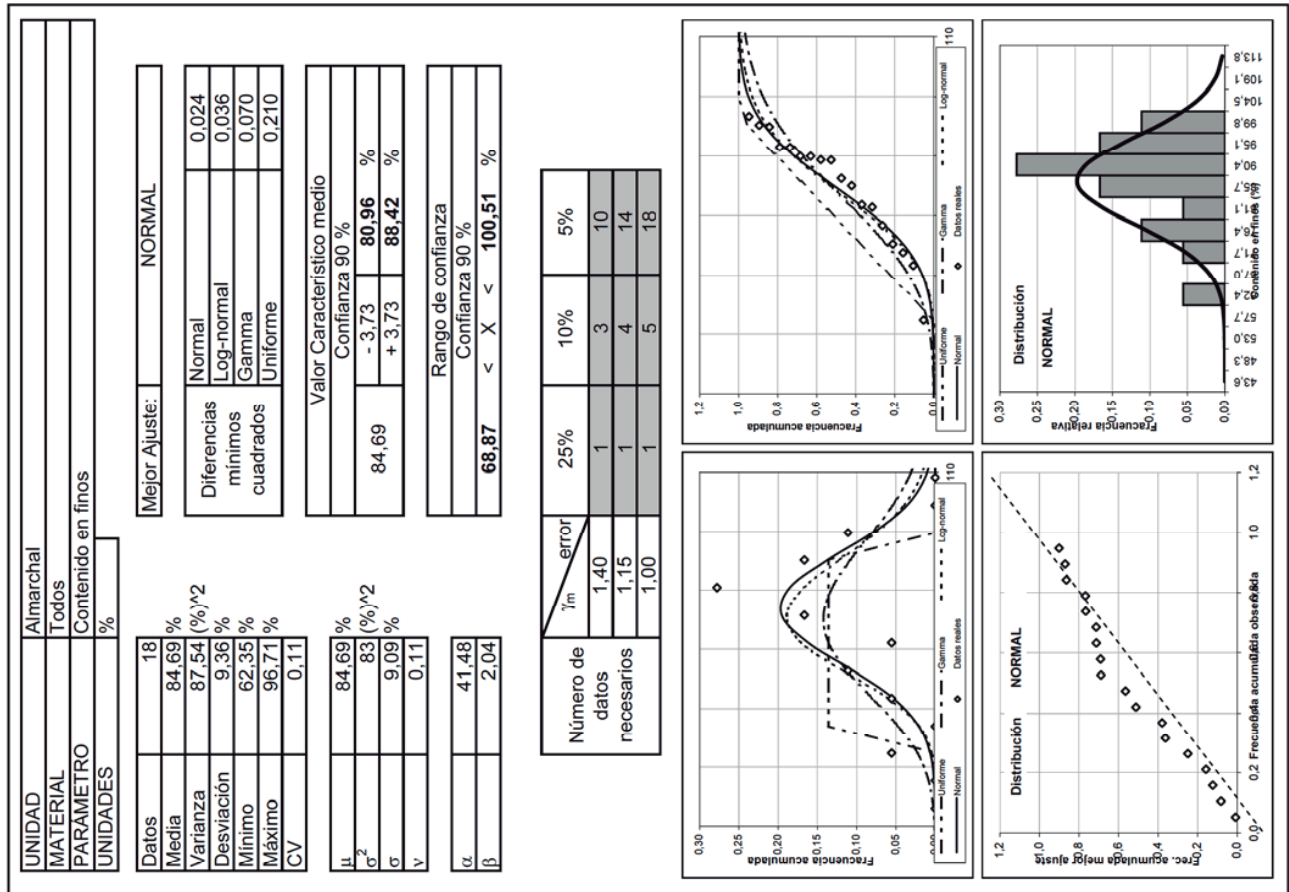
Número de datos necesarios	γ <sub>m</sub>	error	25%	10%	5%
		1.40			
		1.15			
		1.00			

Unidad de Almarchal

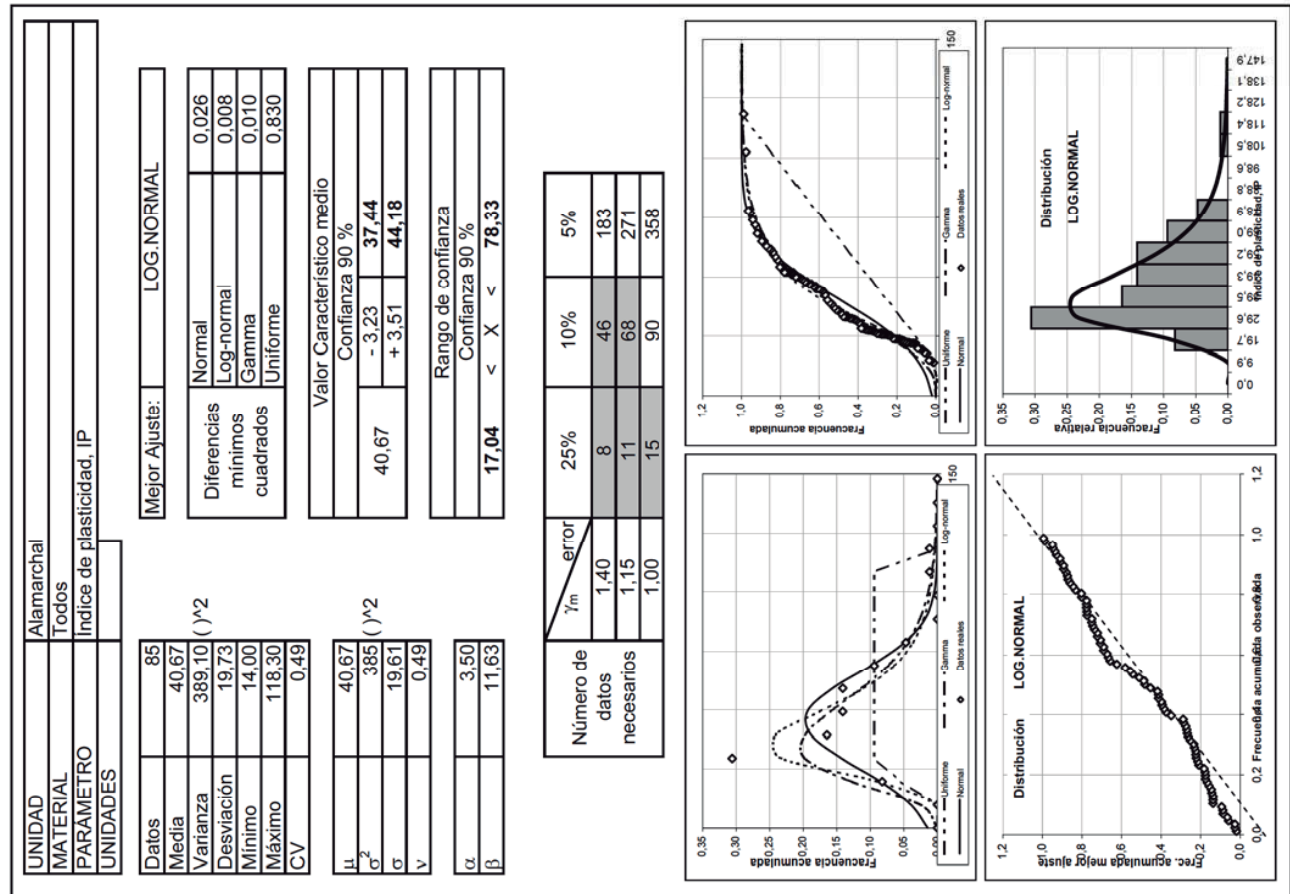
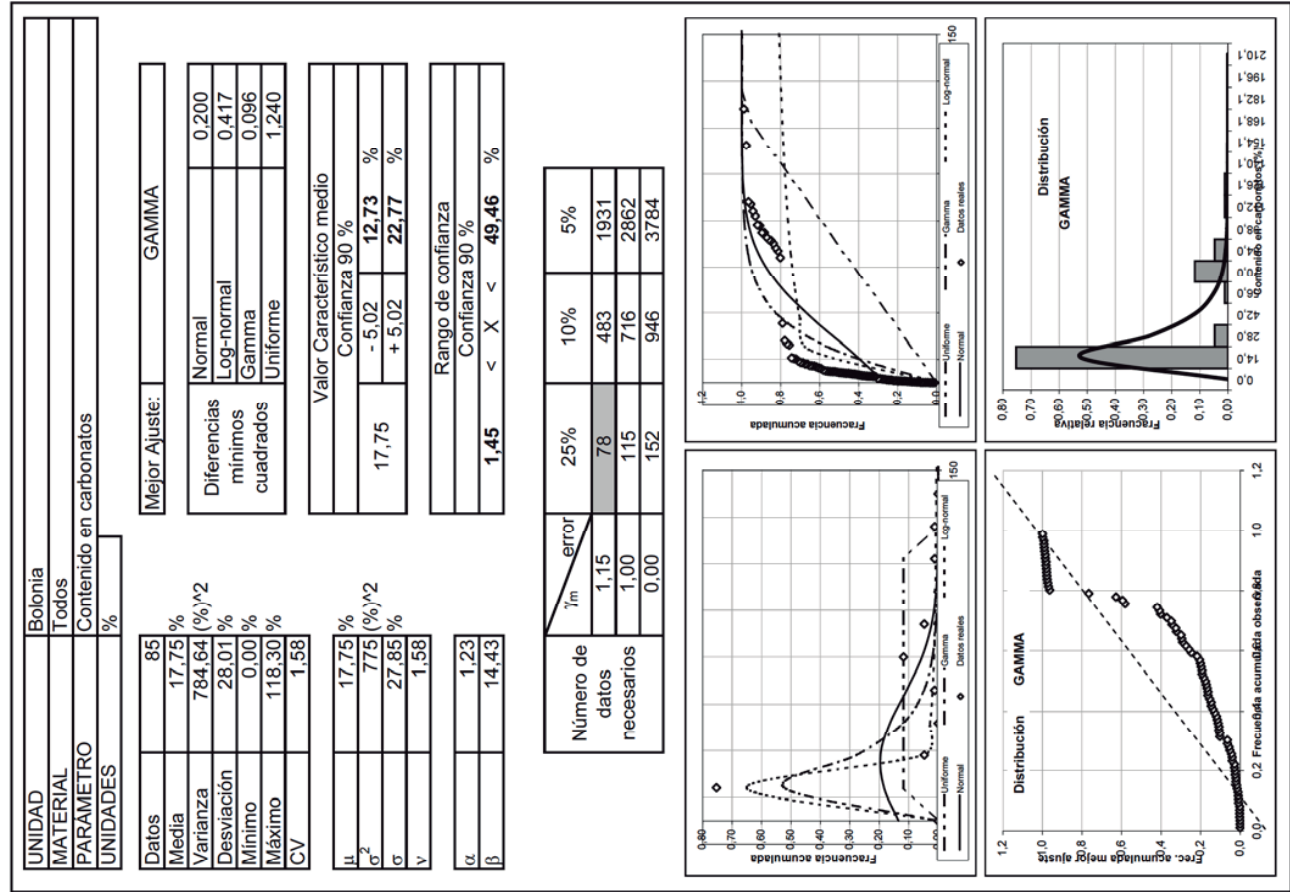












UNIDAD	Almarchal
MATERIAL	Todos
PARAMETRO	Contenido en materia orgánica
UNIDADES	%

Datos	7	Mejor Ajuste:	
Media	0.99 %		
Varianza	0 (%) <sup>2</sup>		
Desviación	0.47 %	Diferencias mínimos cuadrados	Normal
Mínimo	0.60 %		Log-normal
Máximo	1.90 %		Gamma
CV	0.47		Uniforme

$\mu$	0.99 %	Valor Característico medio	
$\sigma^2$	0 (%) <sup>2</sup>	Confianza 90 %	
$\sigma$	0.43 %	0.99	- 0.22 0.77 %
$v$	0.47	+ 0.22	1.21 %

$\alpha$	4.17	Rango de confianza	
$\beta$	0.24		

Número de datos necesarios	$\gamma_m$	$\beta/2$	1,00E-03	1,00E-04	1,00E-05
	1.40				
	1.20				
	1.15				

UNIDAD	Almarchal
MATERIAL	Todos
PARAMETRO	Contenido en sulfatos solubles
UNIDADES	%

Datos	27	Mejor Ajuste:	GAMMA
Media	0.11 %		
Varianza	0.01 (%) <sup>2</sup>		
Desviación	0.10 %	Diferencias mínimos cuadrados	Normal
Mínimo	0.00 %		Log-normal
Máximo	0.51 %		Gamma
CV	0.87		Uniforme

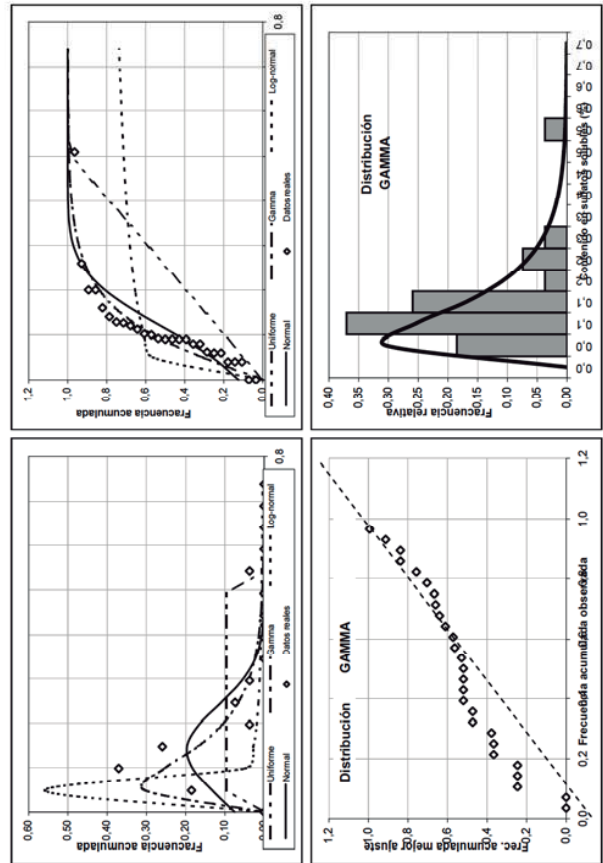
$\mu$	0.11 %	Valor Característico medio	
$\sigma^2$	0 (%) <sup>2</sup>	Confianza 90 %	
$\sigma$	0.10 %	0.11	- 0.03 0.08 %
$v$	0.87	+ 0.03	0.14 %

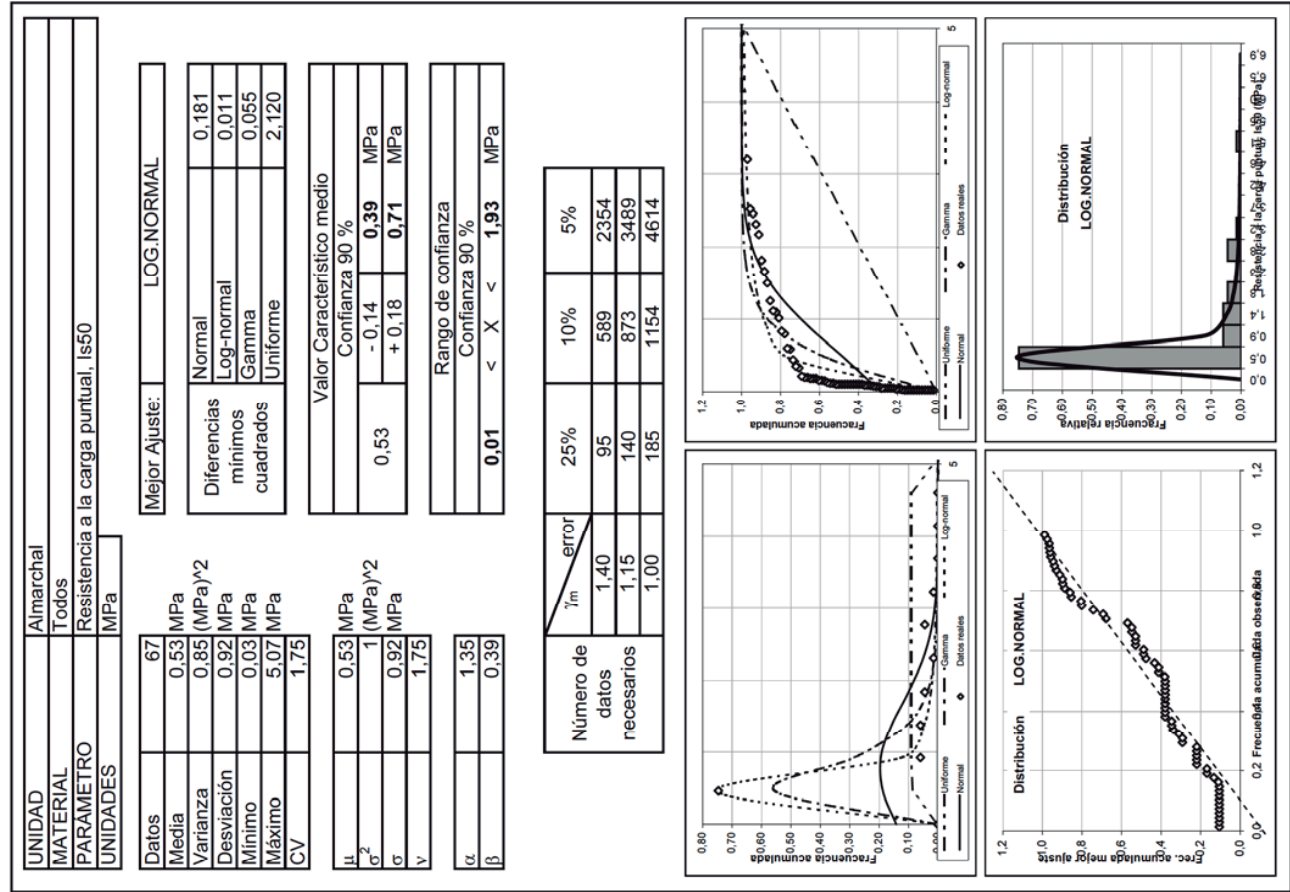
  

$\alpha$	1.27	Rango de confianza	
$\beta$	0.09	Confianza 90 %	0.01 < X < 0.31 %

Número de datos necesarios	$\gamma_m$ error	25%	10%	5%
	1.15	25	156	623
	1.00	37	231	924
	0.00	49	306	1221





UNIDAD

Almarchal

MATERIAL

Todos - sin datos altos

PARAMETRO

Resistencia a compresión simple, RCS

UNIDADES

MPa

Datos

25

Media

0.35 MPa

Varianza

0.05 (MPa)<sup>2</sup>

Desviación

0.22 MPa

Mínimo

0.10 MPa

Máximo

1.02 MPa

CV

0.62

Mejor Ajuste:

GAMMA

Diferencias mínimos

Normal

0.037

cuadrados

Log-normal

0.017

Gamma

0.016

Uniforme

0.552

Valor Característico medio

Confianza 90 %

0.35

- 0.07

0.28

MPa

+ 0.07

0.42

MPa

Rango de confianza

Confianza 90 %

0.08

< X <

0.78

MPa

Número de datos necesarios

1.40

82

25%

10%

5%

1.15

121

483

326

1.00

26

160

639

Fracción acumulada

0.40

0.35

0.30

0.25

0.20

0.15

0.10

0.05

0.00

Uniforme

Log-normal

Datos reales

Fracción acumulada

1.2

1.0

0.8

0.6

0.4

0.2

0.0

Uniforme

Log-normal

Datos reales

Fracción acumulada mejor ajuste

1.2

1.0

0.8

0.6

0.4

0.2

0.0

GAMMA

Fracción acumulada observada

1.2

1.0

0.8

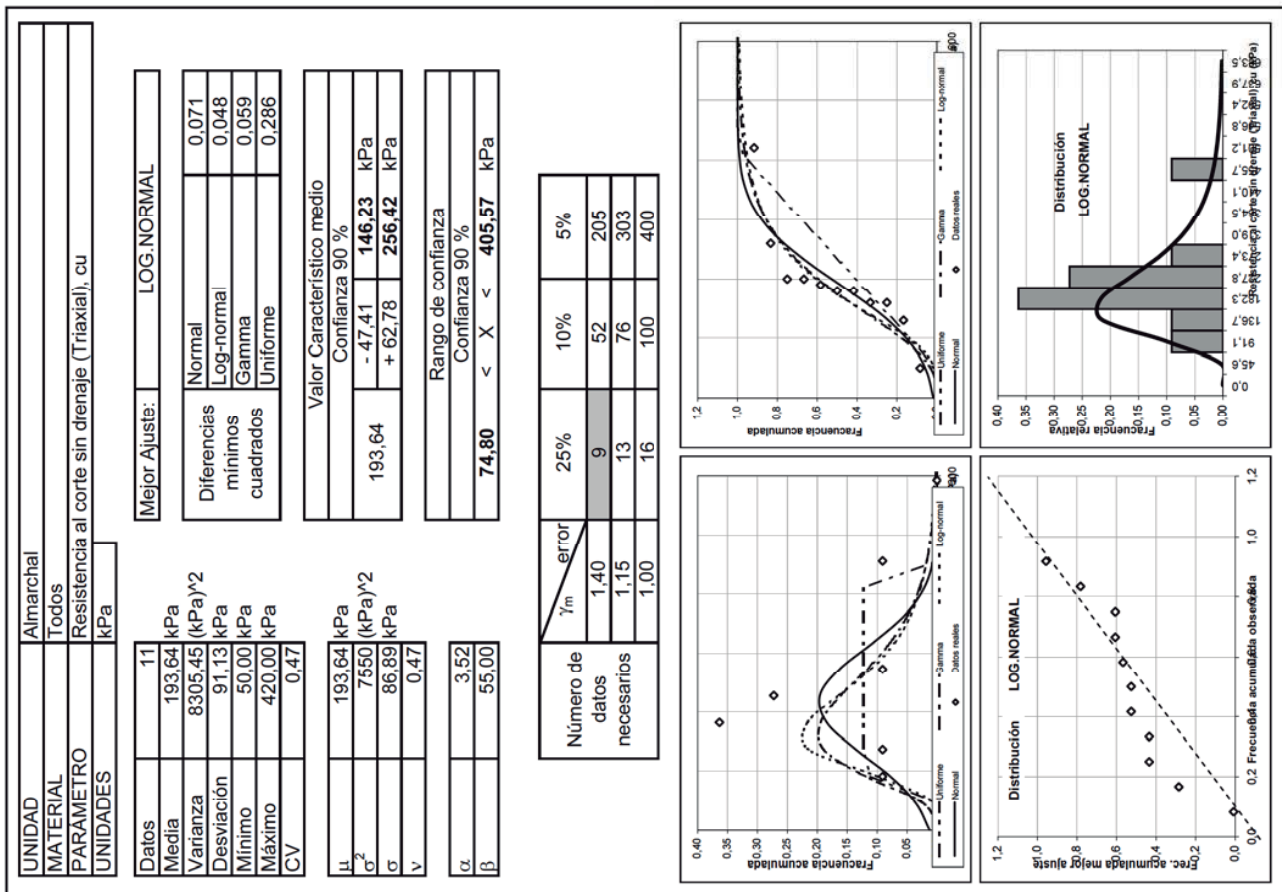
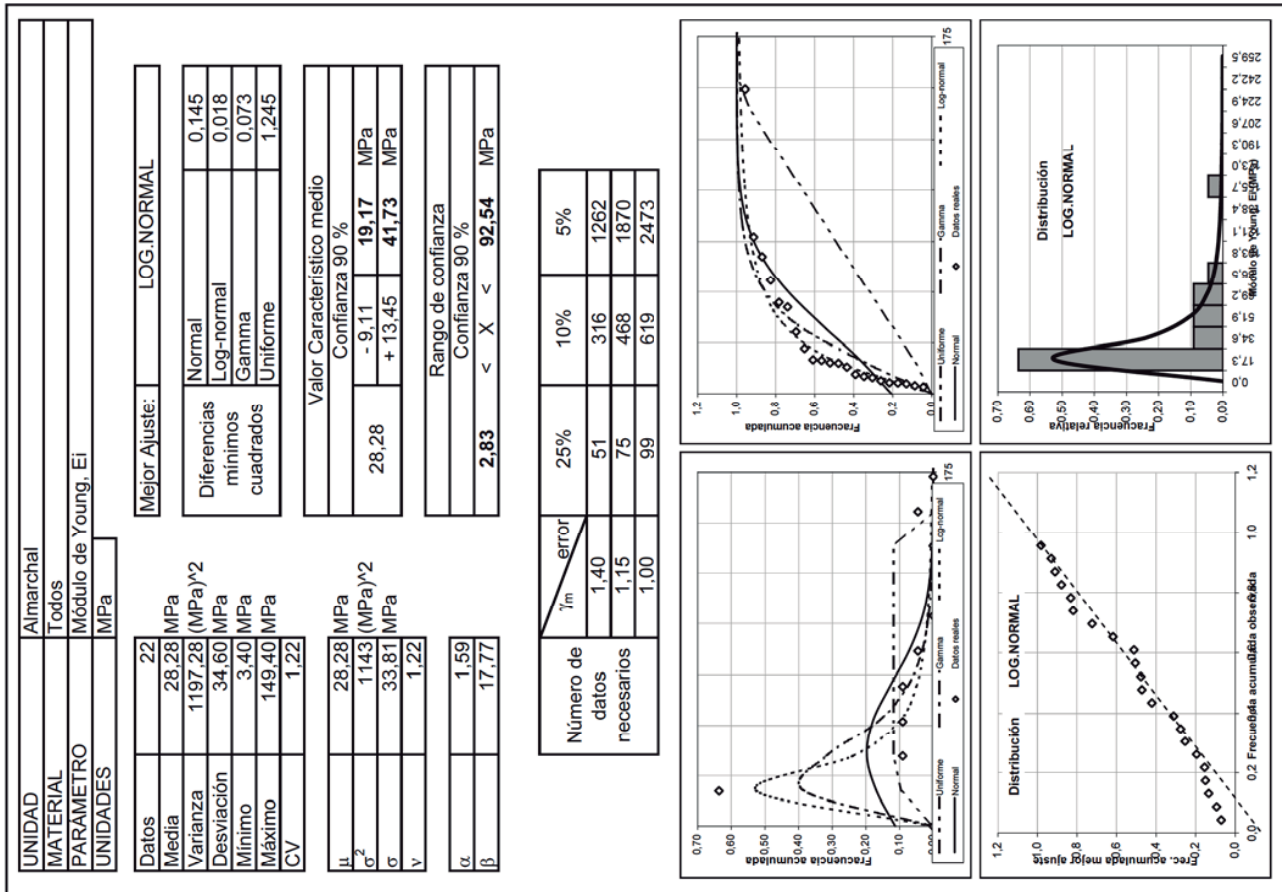
0.6

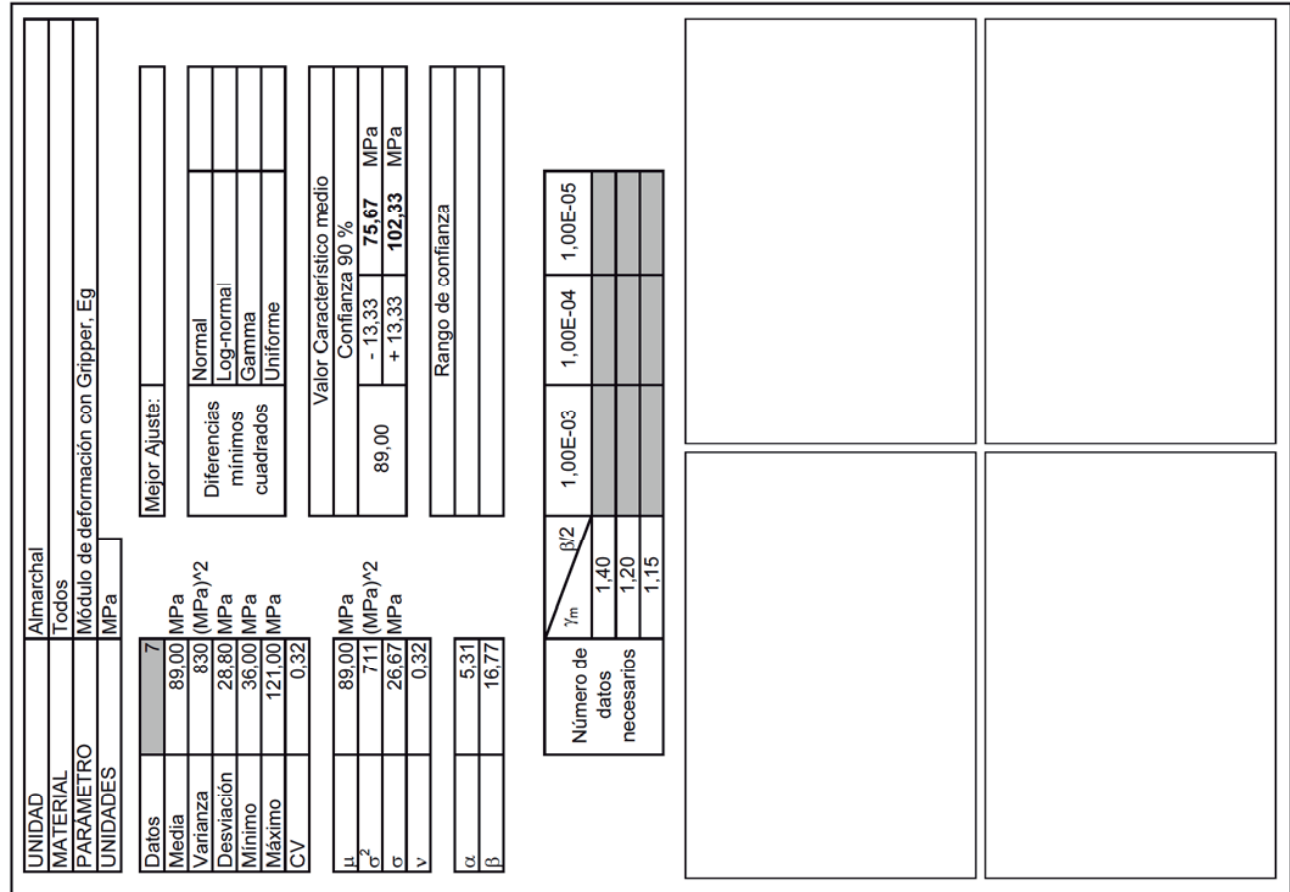
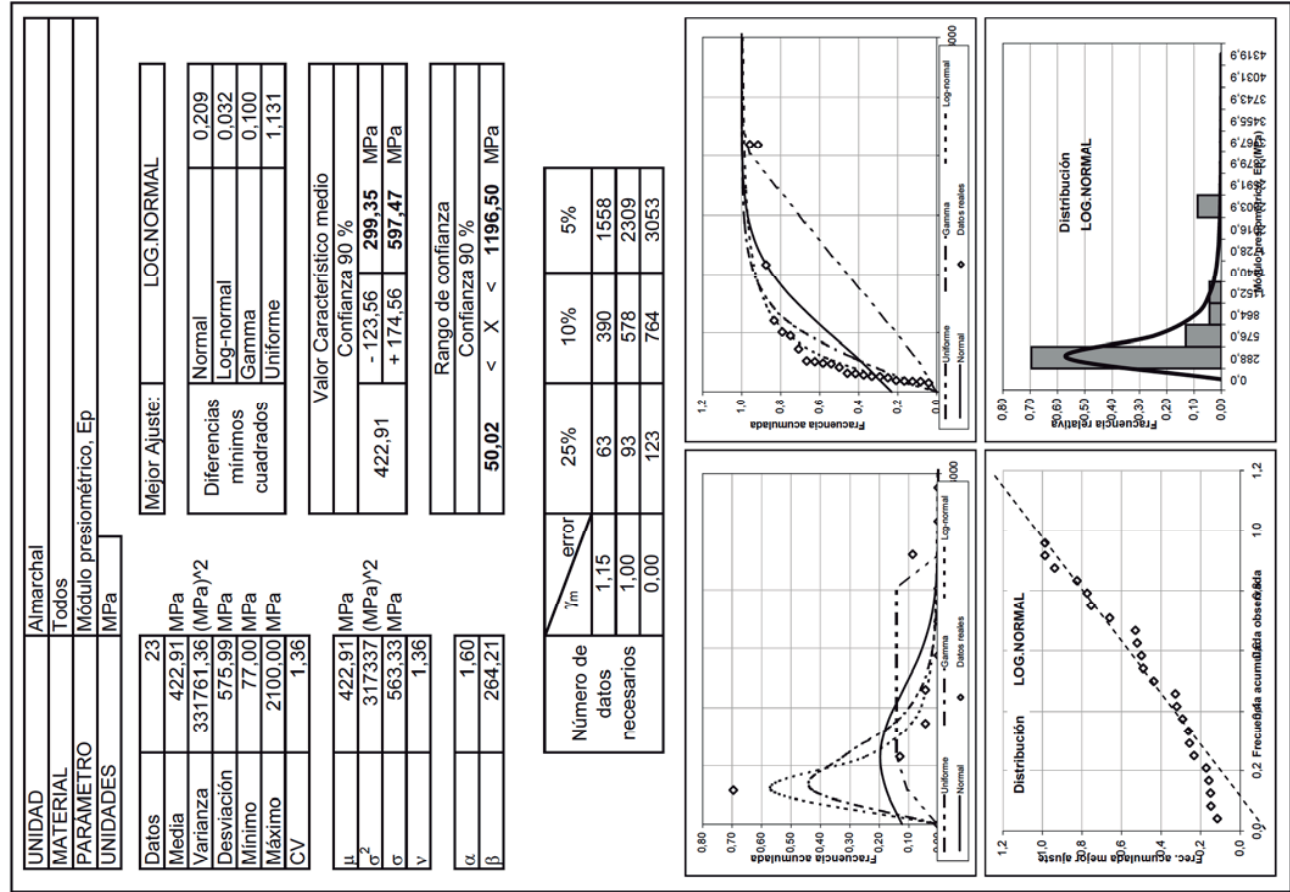
0.4

0.2

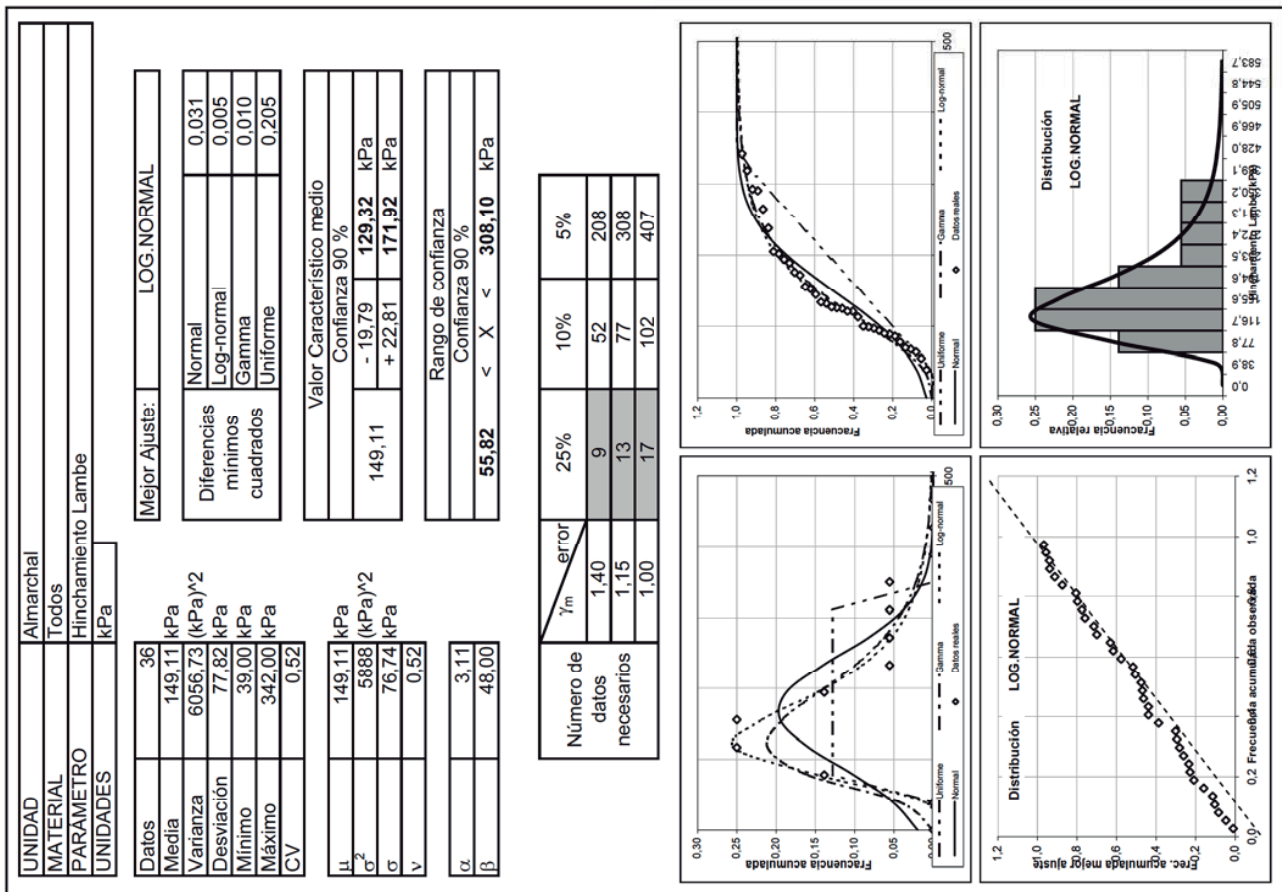
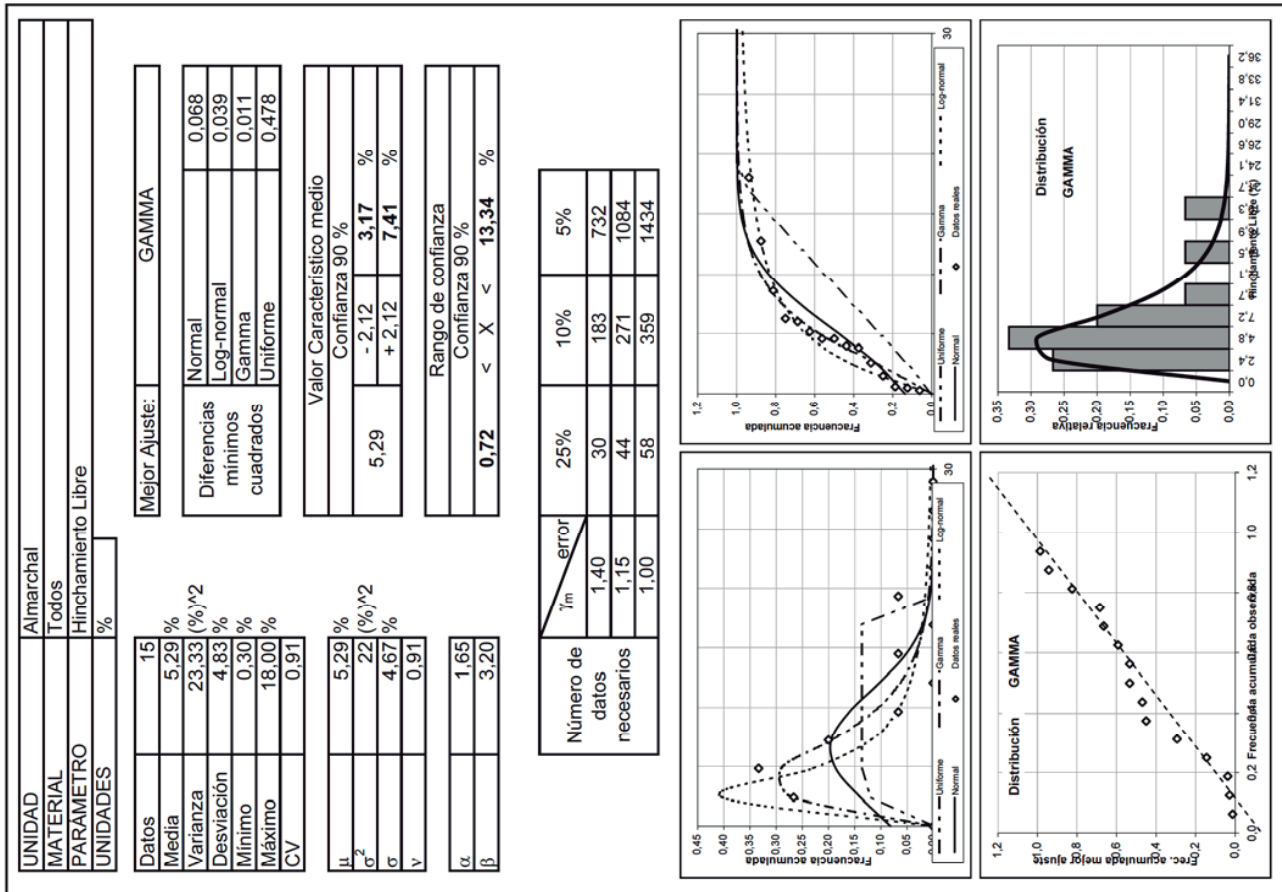
0.0

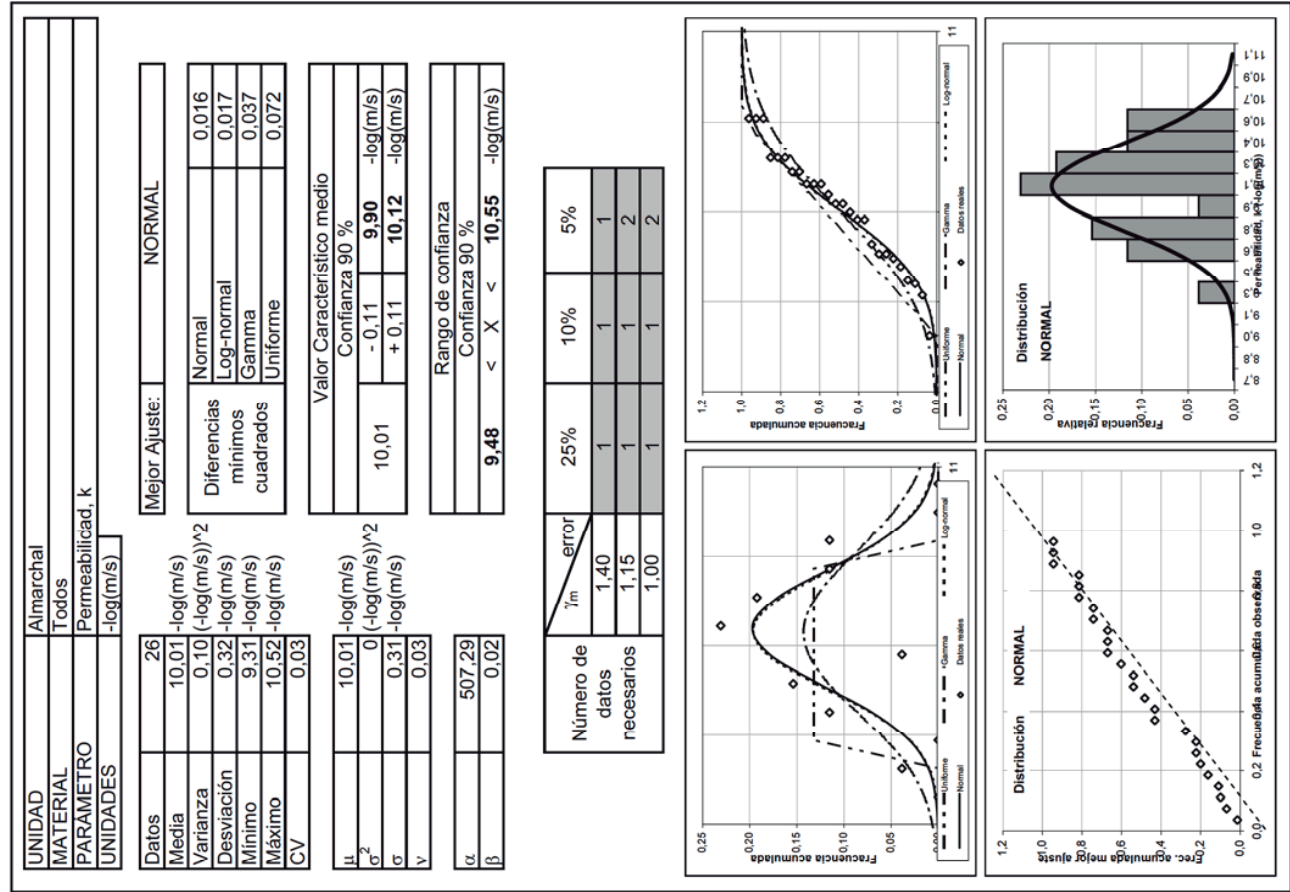
Distribución GAMMA











UNIDAD

Almarchal

MATERIAL

Todos

PARAMETRO

Presión de hinchamiento, Ph

UNIDADES

kPa

Datos

19

Media

129.89

Varianza

6863.77

Desviación

82.85

Mínimo

7.00

Máximo

300.00

CV

0.64

Mejor Ajuste:

NORMAL

Diferencias mínimos cuadrados

Normal

Log-normal

0.024

Gamma

0.106

Uniforme

0.037

0.082

Valor Característico medio

Confianza 90 %

129.89

- 32.08

97.81

kPa

+ 32.08

161.97

kPa

Rango de confianza

Confianza 90 %

0.00

< X <

269.73

kPa

Número de datos necesarios

$\gamma_m$

error

25%

10%

5%

1.40

13

76

303

1.15

18

112

448

1.00

24

149

593

Fracción acumulada

Fracción acumulada

Log-normal

Log-normal

Gamma

Gamma

Datos reales

Datos reales

Distribución NORMAL

Distribución NORMAL

Fracción acumulada mejor ajuste

Fracción acumulada observada

Log-normal

Log-normal

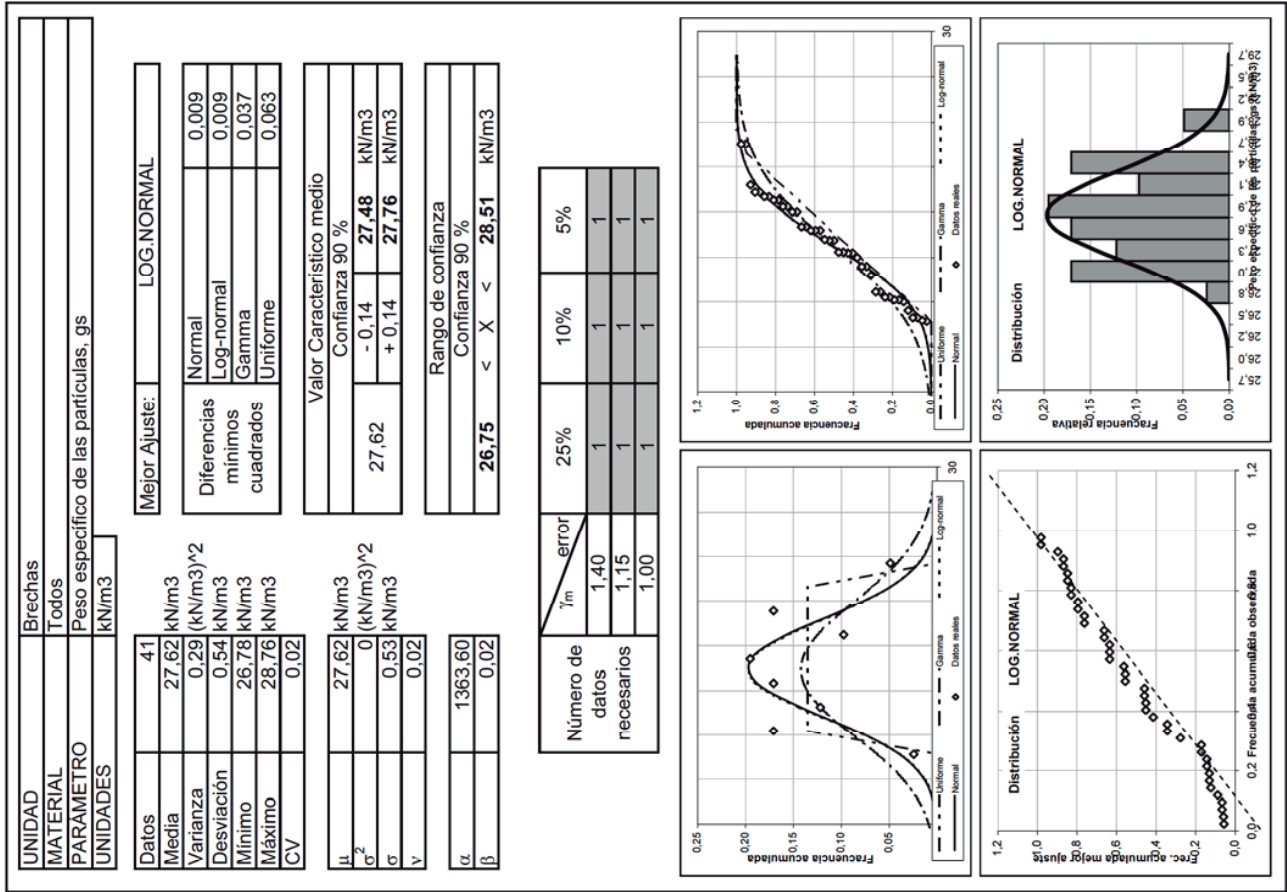
Gamma

Gamma

Datos reales

Datos reales

# Brechas cuaternarias





UNIDAD	Brechas	
MATERIAL	Todos	
PARAMETRO	Peso específico saturado, $g_{sat}$	
UNIDADES	kN/m <sup>3</sup>	

Datos	30
Media	21.57 kN/m <sup>3</sup>
Varianza	0.09 (kN/m <sup>3</sup> ) <sup>2</sup>
Desviación	0.30 kN/m <sup>3</sup>
Mínimo	21.04 kN/m <sup>3</sup>
Máximo	22.02 kN/m <sup>3</sup>
CV	0.01

Mejor Ajuste:		NORMAL
Diferencias mínimas	Normal	0.035
	Log-normal	0.035
	Gamma	0.068
	Uniforme	0.047

Valor Característico medio	
Confianza 90 %	
21.57	- 0.09 <b>21.48</b> kN/m <sup>3</sup>
	+ 0.09 <b>21.66</b> kN/m <sup>3</sup>

Rango de confianza	
Confianza 90 %	
<b>21.08</b>	< X < <b>22.07</b> kN/m <sup>3</sup>

Número de datos necesarios	$\gamma_m$ error		
	25%	10%	5%
1,40	1	1	1
1,15	1	1	1
1,00	1	1	1

Distribución NORMAL

Distribución NORMAL

UNIDAD	Brechas
MATERIAL	Todos
PARAMETRO	Peso específico, g
UNIDADES	kN/m <sup>3</sup>

Datos	78
Media	18,69
Varianza	2,18 (kN/m <sup>3</sup> ) <sup>2</sup>
Desviación	1,48 kN/m <sup>3</sup>
Mínimo	17,00 kN/m <sup>3</sup>
Máximo	24,60 kN/m <sup>3</sup>
CV	0,08

Mejor Ajuste:		LOG-NORMAL
Diferencias mínimas	Normal	0,110
	Log-normal	0,088
	Gamma	0,162
	Uniforme	1,147

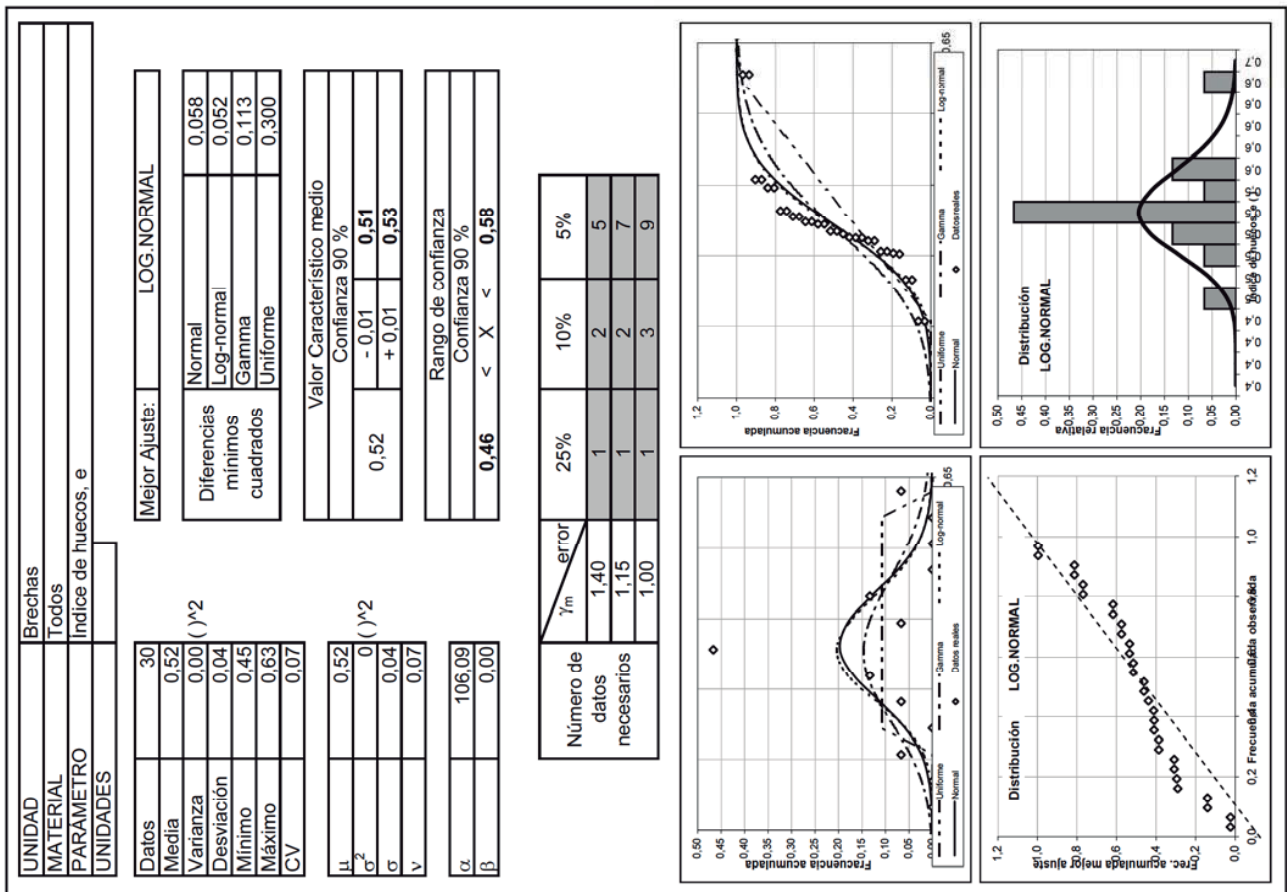
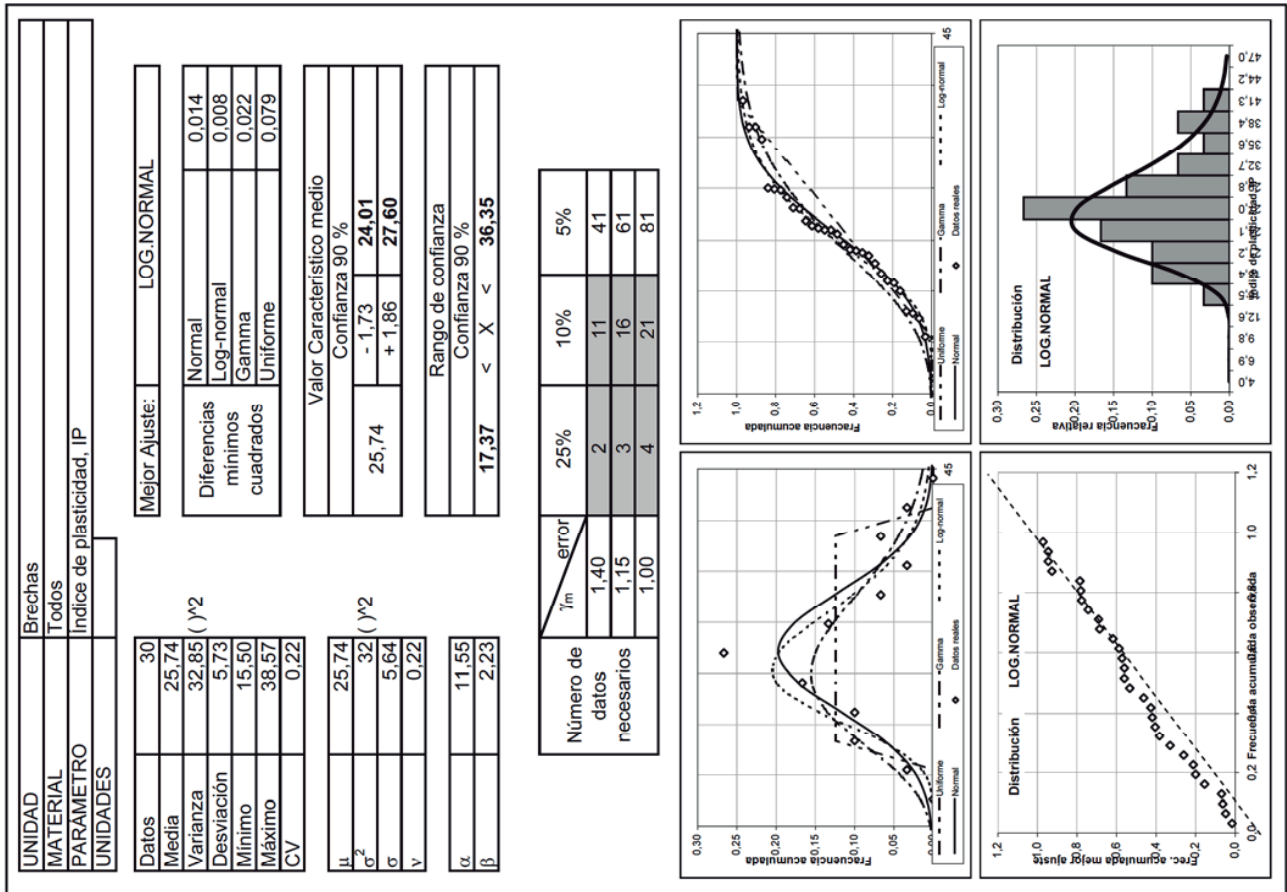
Valor Característico medio	
Confianza 90 %	
18,69	- 0,25 <b>18,44</b> kN/m <sup>3</sup>
	+ 0,26 <b>18,95</b> kN/m <sup>3</sup>

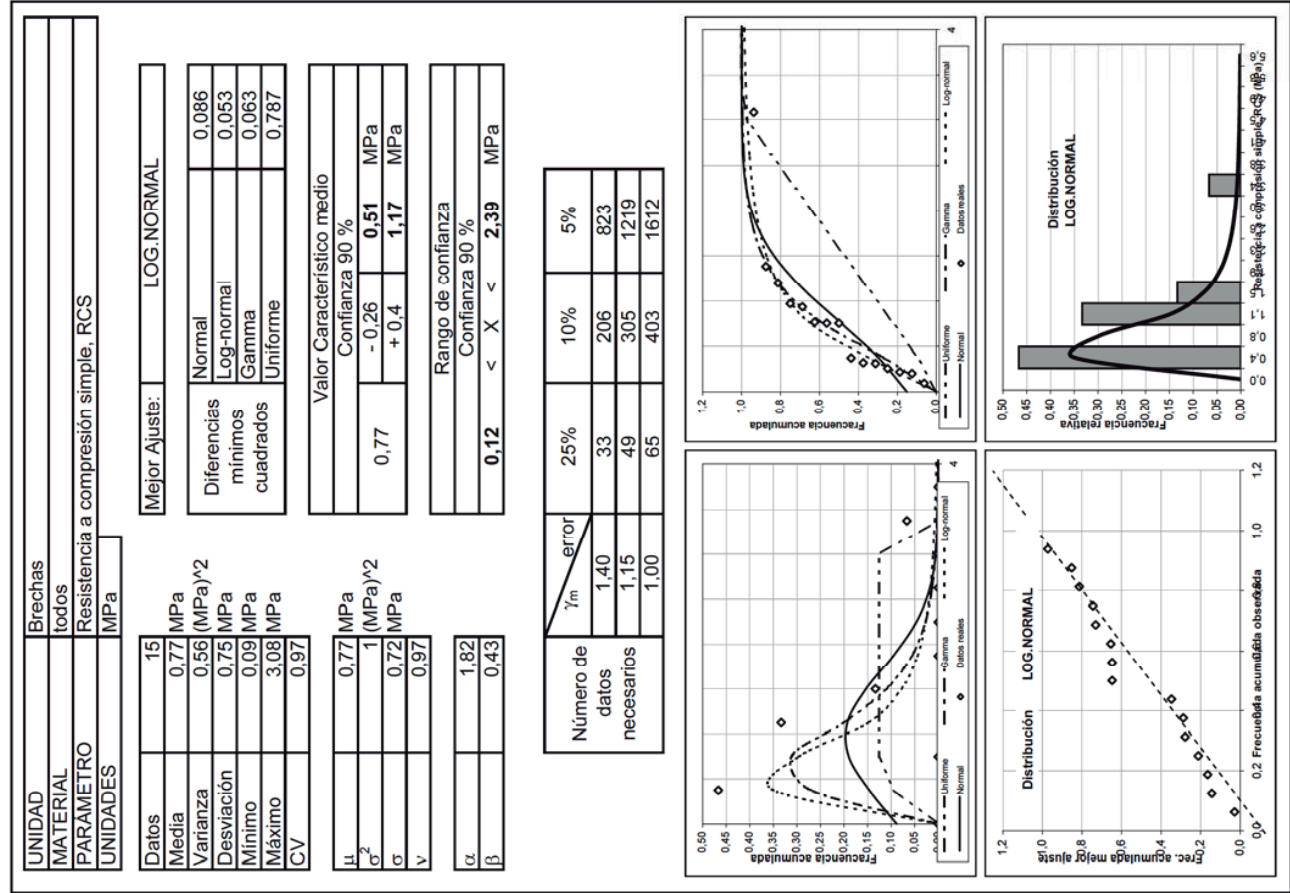
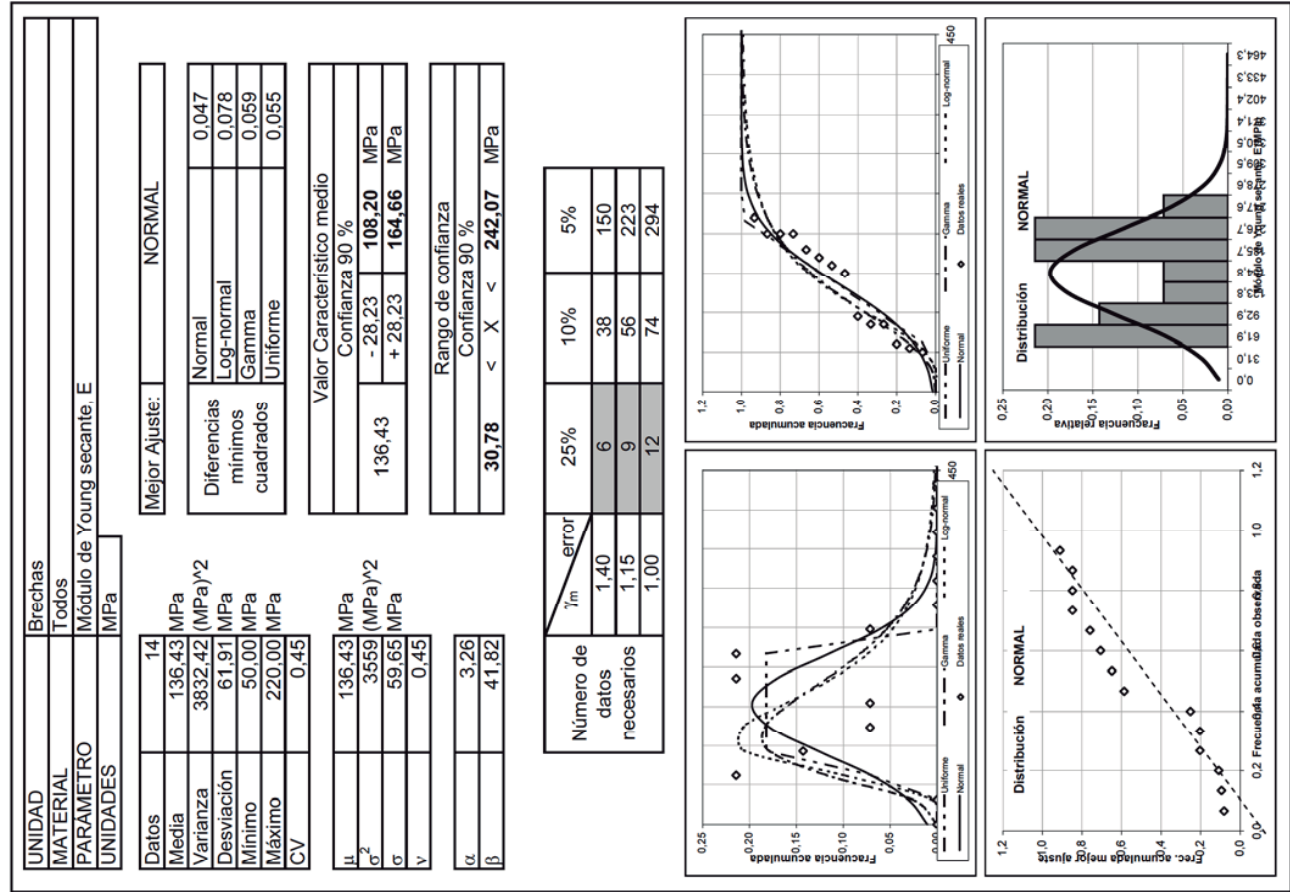
  

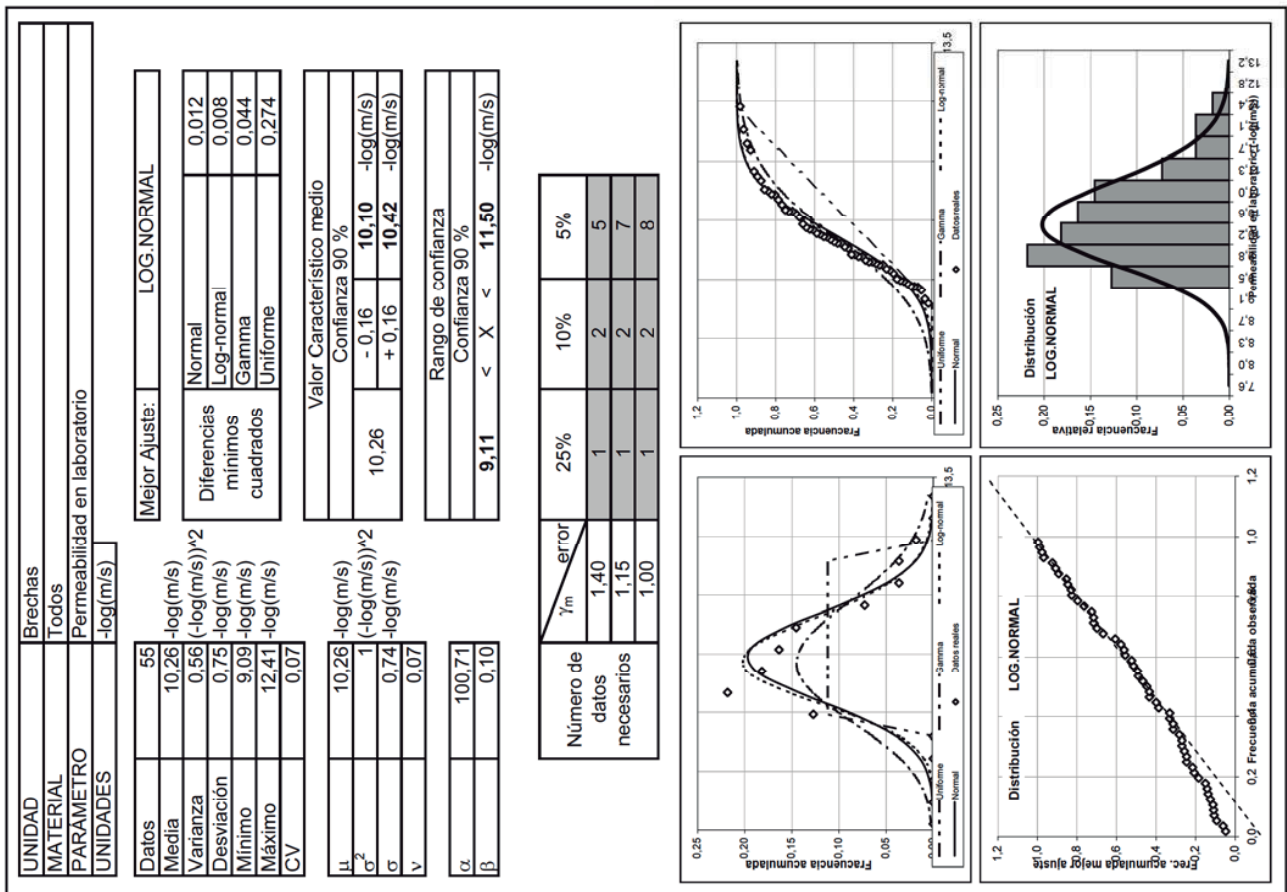
Rango de confianza	
Confianza 90 %	
<b>16,52</b>	< X < <b>21,02</b> kN/m <sup>3</sup>

Número de datos necesarios	$\gamma_m$ error		25%	10%	5%
	1,40	1,15			
1	1	1	1	2	5
1	1	1	1	2	8
1	1	1	1	3	10









## **APÉNDICE IV**

### **RESUMEN DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS**



# APÉNDICE IV: RESUMEN DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

Tabla IV- 1. Tabla resumen de los parámetros geotécnicos de la Unidad de Algeciras. Todos los materiales.

Parámetro	$\gamma_{ap}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	IP	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Is <sub>50</sub> (MPa)	E <sub>i</sub> (MPa)	$\nu$	E <sub>dyn</sub> (MPa)	c (kPa)	$\phi$ (°)	E <sub>p</sub> (MPa)	Hinch. (%)	P <sub>hinch</sub> (kPa)	k -log(m/s)	I <sub>D2</sub> (%)
$\mu$	24,0	2171	-	23,80	3,41	2,15	8334,8	0,26	12893,6	51,94	22,89	1398,5	-	-	9,40	96,02
$\sigma$	2,39	155	-	21,26	2,57	1,02	13056,4	0,10	8076,2	69,06	4,12	1505,8	-	-	2,40	6,69
$\nu$	0,10	0,07	-	0,90	0,76	0,48	1,58	0,39	0,63	1,37	0,19	1,08	-	-	0,27	0,07
X <sub>k,inf</sub>	23,8	2134	-	20,23	2,98	1,95	6395	0,24	11615	23,6	21,20	1155	-	-	8,11	93,73
X <sub>k,sup</sub>	24,3	2207	-	27,37	3,91	2,37	10864	0,29	14313	80,3	24,58	1694	-	-	10,89	98,31

Tabla IV- 2. Tabla resumen de los parámetros geotécnicos de la Unidad de Algeciras. Materiales arcillosos.

Parámetro	$\gamma_{ap}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	IP	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Is <sub>50</sub> (MPa)	E <sub>i</sub> (MPa)	$\nu$	E <sub>dyn</sub> (MPa)	c (kPa)	$\phi$ (°)	E <sub>p</sub> (MPa)	Hinch. (%)	P <sub>hinch</sub> (kPa)	k -log(m/s)	I <sub>D2</sub> (%)
$\mu$	23,1	-	39,2	12,53	2,59	1,57	4394,3	0,28	10963,2	-	-	1223,5	6,60	152,46	-	95,37
$\sigma$	2,58	-	19,0	11,94	2,35	0,63	3101,3	0,11	7061,8	-	-	1235,2	4,01	110,55	-	8,41
$\nu$	0,11	-	0,49	0,96	0,92	0,41	0,71	0,40	0,65	-	-	1,02	0,63	0,75	-	0,09
X <sub>k,inf</sub>	22,8	-	34	9,86	2,16	1,41	3625	0,25	9814	-	-	951	4,70	97,82	-	91,54
X <sub>k,sup</sub>	23,5	-	45	15,20	3,11	1,73	5163	0,32	12247	-	-	1574	8,50	207,10	-	99,20

Tabla IV- 3. Tabla resumen de los parámetros geotécnicos de la Unidad de Algeciras. Materiales detriticos.

Parámetro	$\gamma_{ap}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	IP	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Is <sub>50</sub> (MPa)	E <sub>i</sub> (MPa)	$\nu$	E <sub>dyn</sub> (MPa)	c (kPa)	$\phi$ (°)	E <sub>p</sub> (MPa)	Hinch. (%)	P <sub>hinch</sub> (kPa)	k -log(m/s)	I <sub>D2</sub> (%)
$\mu$	25,0	-	-	30,43	3,15	2,97	8939,2	0,24	12170,6	-	-	-	-	-	-	97,00
$\sigma$	0,99	-	-	11,94	1,91	1,31	6065,9	0,11	3775,7	-	-	-	-	-	-	2,03
$\nu$	0,04	-	-	0,40	0,62	0,45	0,70	0,45	0,35	-	-	-	-	-	-	0,02
X <sub>k,inf</sub>	24,7	-	-	25,81	2,50	2,50	6371	0,19	8571	-	-	-	-	-	-	95,82
X <sub>k,sup</sub>	25,2	-	-	35,05	3,80	3,44	11508	0,29	15770	-	-	-	-	-	-	98,18

Tabla IV- 4. Tabla resumen de los parámetros geotécnicos de la Unidad de Algeciras. Materiales calcáreos.

Parámetro	$\gamma_{ap}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	IP	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Is <sub>50</sub> (MPa)	E <sub>i</sub> (MPa)	$\nu$	E <sub>dyn</sub> (MPa)	c (kPa)	$\phi$ (°)	E <sub>p</sub> (MPa)	Hinch. (%)	P <sub>hinch</sub> (kPa)	k -log(m/s)	I <sub>D2</sub> (%)
$\mu$	25,6	-	-	46,44	5,16	3,72	17929,2	0,29	20487,4	-	-	1117,2	-	-	-	-
$\sigma$	1,09	-	-	25,36	2,86	1,14	24245,9	0,12	8177,3	-	-	552,7	-	-	-	-
$\nu$	0,04	-	-	0,56	0,57	0,33	1,39	0,41	0,41	-	-	0,52	-	-	-	-
X <sub>k,inf</sub>	25,3	-	-	37,14	4,02	2,79	6809	0,23	17025	-	-	797	-	-	-	-
X <sub>k,sup</sub>	25,8	-	-	55,74	6,30	4,65	47209	0,36	23950	-	-	1438	-	-	-	-



Tabla IV- 5. Tabla resumen de los parámetros geotécnicos de la Unidad de Bolonia. Todos los materiales

ímetro	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	IP	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Is <sub>50</sub> (MPa)	E <sub>i</sub> (MPa)	$\nu$	E <sub>dyn</sub> (MPa)	c (kPa)	$\phi$ (°)	E <sub>pc</sub> (MPa)	Hinch. (%)	P <sub>Hinch</sub> (kPa)	k -log(m/s)	Id <sub>2</sub> (%)
$\mu$	18,44	1574,17	33,33	58,06	-	1,28	-	-	-	-	-	232,50	-	679,00	-	14,60
$\sigma$	1,66	82,91	13,56	37,36	-	1,32	-	-	-	-	-	218,73	-	601,30	-	21,03
$\nu$	0,09	0,06	0,41	0,66	-	1,04	-	-	-	-	-	0,98	-	0,91	-	1,58
$\epsilon_{k,inf}$	17,92	1531	29,86	42,24	-	1,04	-	-	-	-	-	119,10	-	424,39	-	4,09
k <sub>sup</sub>	18,97	1617	37,21	73,88	-	1,52	-	-	-	-	-	345,90	-	933,61	-	25,11

Tabla IV- 6. Tabla resumen de los parámetros geotécnicos de la Unidad de Bolonia. Materiales arcillosos.

ímetro	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	IP	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Is <sub>50</sub> (MPa)	E <sub>i</sub> (MPa)	$\nu$	E <sub>dyn</sub> (MPa)	c (kPa)	$\phi$ (°)	E <sub>pc</sub> (MPa)	Hinch. (%)	P <sub>Hinch</sub> (kPa)	k -log(m/s)	Id <sub>2</sub> (%)
$\mu$	17,59	1613,33	0,99	87,18	-	0,99	-	-	-	-	-	30,50	-	620,23	-	-
$\sigma$	1,01	31,45	1,27	20,84	-	1,27	-	-	-	-	-	26,44	-	673,06	-	-
$\nu$	0,06	0,02	1,29	0,26	-	1,29	-	-	-	-	-	0,95	-	1,13	-	-
$\epsilon_{k,inf}$	17,21	1598	0,63	76,76	-	0,63	-	-	-	-	-	17,28	-	336,69	-	-
k <sub>sup</sub>	17,97	1629	1,55	97,60	-	1,55	-	-	-	-	-	43,72	-	1142,56	-	-

Tabla IV- 7. Tabla resumen de los parámetros geotécnicos de la Unidad de Bolonia. Materiales detriticos.

ímetro	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	IP	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Is <sub>50</sub> (MPa)	E <sub>i</sub> (MPa)	$\nu$	E <sub>dyn</sub> (MPa)	c (kPa)	$\phi$ (°)	E <sub>pc</sub> (MPa)	Hinch. (%)	P <sub>Hinch</sub> (kPa)	k -log(m/s)	Id <sub>2</sub> (%)
$\mu$	20,42	1535	18,63	42,18	-	1,16	-	-	-	-	-	434,50	-	870,00	-	-
$\sigma$	1,11	98,4	2,70	34,72	-	0,96	-	-	-	-	-	115,68	-	129,03	-	-
$\nu$	0,06	0,07	0,16	0,86	-	0,84	-	-	-	-	-	0,29	-	0,17	-	-
$\epsilon_{k,inf}$	19,87	1486	17,28	28,29	-	0,90	-	-	-	-	-	376,66	-	805,48	-	-
k <sub>sup</sub>	20,97	1584	19,98	62,89	-	1,49	-	-	-	-	-	492,34	-	934,52	-	-

Tabla IV- 8. Tabla resumen de los parámetros geotécnicos de la Unidad de Bolonia. Materiales calcáreos.

ímetro	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	IP	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Is <sub>50</sub> (MPa)	E <sub>i</sub> (MPa)	$\nu$	E <sub>dyn</sub> (MPa)	c (kPa)	$\phi$ (°)	E <sub>p</sub> (MPa)	Hinch. (%)	P <sub>Hinch</sub> (kPa)	k -log(m/s)	Id <sub>2</sub> (%)
$\mu$	-	-	-	-	-	2,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\sigma$	-	-	-	-	-	1,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\nu$	-	-	-	-	-	0,82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\epsilon_{k,inf}$	-	-	-	-	-	1,39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
k <sub>sup</sub>	-	-	-	-	-	2,89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla IV- 9. Tabla resumen de los parámetros geotécnicos de la Unidad de Facinas.

ímetro	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	IP	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Is <sub>50</sub> (MPa)	E <sub>i</sub> (MPa)	$\nu$	E <sub>dyn</sub> (MPa)	c (kPa)	$\phi$ (°)	Ep (MPa)	Hinch. (%)	P <sub>Hinch</sub> (%)	k -log(m/s)	lb <sub>2</sub> (%)
$\mu$	18,38	-	32,29	-	-	-	-	-	-	-	-	44,99	-	-	-	-
$\sigma$	1,18	-	9,82	-	-	-	-	-	-	-	-	41,10	-	-	-	-
$\nu$	0,07	-	0,31	-	-	-	-	-	-	-	-	0,92	-	-	-	-
$\phi_{k,inf}$	17,81	-	29	-	-	-	-	-	-	-	-	35,56	-	-	-	-
k <sub>sup</sub>	18,97	-	36	-	-	-	-	-	-	-	-	56,93	-	-	-	-

Tabla IV- 10. Tabla resumen de los parámetros geotécnicos de la Unidad de Almarchal. Todos los materiales.

ímetro	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	IP	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Is <sub>50</sub> (MPa)	E <sub>i</sub> (MPa)	$\nu$	E <sub>dyn</sub> (MPa)	c (kPa)	$\phi$ (°)	Ep (MPa)	Hinch. (%)	P <sub>Hinch</sub> (%)	k -log(m/s)	lb <sub>2</sub> (%)
$\mu$	22,72	1648,2	40,67	0,35	-	0,53	28,28	-	-	-	-	422,9	5,29	129,89	10,01	-
$\sigma$	0,76	125,4	19,61	0,21	-	0,92	33,81	-	-	-	-	563,3	4,67	80,64	0,31	-
$\nu$	0,03	0,08	0,49	0,62	-	1,75	1,22	-	-	-	-	1,4	0,91	0,64	0,03	-
$\phi_{k,inf}$	22,51	1601	37,44	0,28	-	0,39	19,17	-	-	-	-	299	3,17	97,81	9,90	-
k <sub>sup</sub>	22,93	1696	44,18	0,42	-	0,71	41,73	-	-	-	-	597	7,41	161,97	10,12	-

Tabla IV- 11. Tabla resumen de los parámetros geotécnicos de la Brechas plicuaternarias.

ímetro	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	IP	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Is <sub>50</sub> (MPa)	E <sub>i</sub> (MPa)	$\nu$	E <sub>dyn</sub> (MPa)	c (kPa)	$\phi$ (°)	Ep (MPa)	Hinch. (%)	P <sub>Hinch</sub> (%)	k -log(m/s)	lb <sub>2</sub> (%)
$\mu$	21,57	-	25,74	0,77	-	-	136,43	-	-	-	-	-	-	-	10,26	-
$\sigma$	0,29	-	5,64	0,72	-	-	59,65	-	-	-	-	-	-	-	0,74	-
$\nu$	0,01	-	0,22	0,97	-	-	0,45	-	-	-	-	-	-	-	0,07	-
$\phi_{k,inf}$	21,48	-	24,01	0,51	-	-	108,20	-	-	-	-	-	-	-	10,10	-
k <sub>sup</sub>	21,66	-	27,60	1,17	-	-	164,66	-	-	-	-	-	-	-	10,42	-

Tabla IV- 12. Tabla resumen de los parámetros geotécnicos de las Arenas biclásticas.

ímetro	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	IP	RCS (MPa)	RTI (MPa)	Is <sub>50</sub> (MPa)	E <sub>i</sub> (MPa)	$\nu$	E <sub>dyn</sub> (MPa)	c (kPa)	$\phi$ (°)	Ep (MPa)	Hinch. (%)	P <sub>Hinch</sub> (%)	k -log(m/s)	lb <sub>2</sub> (%)
$\mu$	21,46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,02	-
$\sigma$	0,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,29	-
$\nu$	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,19	-
$\phi_{k,inf}$	21,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,38	-
k <sub>sup</sub>	21,77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,66	-



## **APÉNDICE V**

### **EJEMPLO DE PROGRAMA DE CÁLCULO EN 3DEC**



## APÉNDICE V: EJEMPLO DE PROGRAMA DE CÁLCULO UTILIZADO EN 3DEC

A continuación se muestra el código utilizado para la simulación de un ensayo presiométrico en el modelo presentado en el capítulo 6 para el caso de un buzamiento de 70°.

```
new
;%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%MODELO%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
;
;      - 2 m x 2 m x 3 m
;      - E=4500 MPa
;      - n=0,28
;      - g=24 kN/m3
;      - JUNTAS A 70º
;      - Espaciado = 0.04 m
;      - Insitu=3,3,3 MPa
;      - kn = 50.000 MPa
;      - ks = 800 MPa
;
;===== CREACIÓN DEL CUBO =====
;
Poly brick (-0.10,0.10) (-0.10,0.10) (-1,0.25)
Poly brick (-0.10,0.10) (-0.10,0.10) (0.25,0.5)
Poly brick (-0.10,0.10) (-0.10,0.10) (0.5,0.75)
Poly brick (-0.10,0.10) (-0.10,0.10) (0.75,2)
;
Poly brick (-0.5,-0.10) (-0.5,0.5) (-1,0.25)
Poly brick (-0.5,-0.10) (-0.5,0.5) (0.25,0.75)
Poly brick (-0.5,-0.10) (-0.5,0.5) (0.75,2)
;
Poly brick (0.10,0.5) (-0.5,0.5) (-1,0.25)
Poly brick (0.10,0.5) (-0.5,0.5) (0.25,0.75)
Poly brick (0.10,0.5) (-0.5,0.5) (0.75,2)
;
Poly brick (-0.10,0.10) (0.10,0.5) (-1,0.25)
Poly brick (-0.10,0.10) (0.10,0.5) (0.25,0.75)
Poly brick (-0.10,0.10) (0.10,0.5) (0.75,2)
;
Poly brick (-0.10,0.10) (-0.5,-0.10) (-1,0.25)
Poly brick (-0.10,0.10) (-0.5,-0.10) (0.25,0.75)
Poly brick (-0.10,0.10) (-0.5,-0.10) (0.75,2)
;
Poly brick (0.5,1) (-1,1) (-1,2)
Poly brick (-1,-0.5) (-1,1) (-1,2)
Poly brick (-0.5,0.5) (0.5,1) (-1,2)
Poly brick (-0.5,0.5) (-1,-0.5) (-1,2)
;
mark region 1
;
hide range z 0.25,0.75
mark region 2
```

```

;
seek
join on
;
;
;=====CREACIÓN DEL SONDEO=====
;
tunnel radial a 0.05,0,-1 &
0.0483,0.01294,-1 &
0.0433,0.025,-1 &
0.03536,0.03536,-1 &
0.025,0.0433,-1 &
0.01294,0.0483,-1 &
0,0.05,-1 &
-0.01294,0.0483,-1 &
-0.025,0.0433,-1 &
-0.03536,0.03536,-1 &
-0.0433,0.025,-1 &
-0.0483,0.01294,-1 &
-0.05,0,-1 &
-0.0483,-0.01294,-1 &
-0.0433,-0.025,-1 &
-0.03536,-0.03536,-1 &
-0.025,-0.0433,-1 &
-0.01294,-0.0483,-1 &
0,-0.05,-1 &
0.01294,-0.0483,-1 &
0.025,-0.0433,-1 &
0.03536,-0.03536,-1 &
0.0433,-0.025,-1 &
0.0483,-0.01294,-1 &
b 0.05,0,2 &
0.0483,0.01294,2 &
0.0433,0.025,2 &
0.03536,0.03536,2 &
0.025,0.0433,2 &
0.01294,0.0483,2 &
0,0.05,2 &
-0.01294,0.0483,2 &
-0.025,0.0433,2 &
-0.03536,0.03536,2 &
-0.0433,0.025,2 &
-0.0483,0.01294,2 &
-0.05,0,2 &
-0.0483,-0.01294,2 &
-0.0433,-0.025,2 &
-0.03536,-0.03536,2 &
-0.025,-0.0433,2 &
-0.01294,-0.0483,2 &
0,-0.05,2 &
0.01294,-0.0483,2 &
0.025,-0.0433,2 &
0.03536,-0.03536,2 &
0.0433,-0.025,2 &
0.0483,-0.01294,2 &
;
hide region 1
hide region 2
join on

```

```

seek
join on
;
plot block colorby region
plot set dip 50 dd 115
;=====CREAR JUNTAS=====
;
jset dip 70 dd 0 spacing 0.04 num 200 or 0,0,0.5
;
;=====MALLADO=====
;
gen edge 0.01 range x -0.10,0.10 y -0.10,0.10 z 0.25,0.75
gen edge 0.02 range x -0.5,0.5 y -0.5,0.5 z 0,1
gen edge 0.04 range x -1,1 y -1,1 z 0,1
gen edge 0.08
;
;=====PROPIEDADES ROCA=====
;
prop mat=1 dens 0.0024 bulk 3409.091 g 1757.813
change mat 1 cons 1
;
;=====PROPIEDADES JUNTAS=====
;
prop jmat=1 kn=50000 ks=800 f=25 c=0.6
change jmat 1 jcons 1
;
;=====LIMITAR MOVIMIENTOS EN LAS CARAS=====
;
boundary xvel = 0 yvel = 0 zvel = 0 range z (-1.1,-0.97)
boundary xvel = 0 yvel = 0 zvel = 0 range z (2.1,1.97)
boundary xvel = 0 yvel = 0 zvel = 0 range x (-1.1,-0.97)
boundary xvel = 0 yvel = 0 zvel = 0 range x (0.97,1.1)
boundary yvel = 0 yvel = 0 zvel = 0 range y (-1.1,-0.97)
boundary yvel = 0 yvel = 0 zvel = 0 range y (0.97,1.1)
;
;=====INSITU=====
;
hist unbal
plot bc smax &
      hist 1 ya min 0
insitu stress -3,-3,-3 0,0,0
step 1000
;
reset disp
;
;=====SONDEO=====
;
remove region 0
;
plot hist 1 be 1000 po 0,50 s 50,50 yaxis label 'Unbalanced forces'
step 1000
;
reset disp
;
;=====PRESIÓN DE 10 MPa=====
;
bound range cy end1 0,0,0.25 end2 0,0,0.75 r 0.05005 stress -10,-10,0 0,0,0
;
;=====REGISTRO DE DATOS=====

```



```

;
hist xdis 0.05,0,0.5
hist xdis 0.0483,0.01294,0.5
hist xdis 0.0433,0.025,0.5
hist xdis 0.03536,0.03536,0.5
hist xdis 0.025,0.0433,0.5
hist xdis 0.01294,0.0483,0.5
hist xdis 0,0.05,0.5
hist xdis -0.01294,0.0483,0.5
hist xdis -0.025,0.0433,0.5
hist xdis -0.03536,0.03536,0.5
hist xdis -0.0433,0.025,0.5
hist xdis -0.0483,0.01294,0.5
hist xdis -0.05,0,0.5
hist xdis -0.0483,-0.01294,0.5
hist xdis -0.0433,-0.025,0.5
hist xdis -0.03536,-0.03536,0.5
hist xdis -0.025,-0.0433,0.5
hist xdis -0.01294,-0.0483,0.5
hist xdis 0,-0.05,0.5
hist xdis 0.01294,-0.0483,0.5
hist xdis 0.025,-0.0433,0.5
hist xdis 0.03536,-0.03536,0.5
hist xdis 0.0433,-0.025,0.5
hist xdis 0.0483,-0.01294,0.5
;
hist ydis 0.05,0,0.5
hist ydis 0.0483,0.01294,0.5
hist ydis 0.0433,0.025,0.5
hist ydis 0.03536,0.03536,0.5
hist ydis 0.025,0.0433,0.5
hist ydis 0.01294,0.0483,0.5
hist ydis 0,0.05,0.5
hist ydis -0.01294,0.0483,0.5
hist ydis -0.025,0.0433,0.5
hist ydis -0.03536,0.03536,0.5
hist ydis -0.0433,0.025,0.5
hist ydis -0.0483,0.01294,0.5
hist ydis -0.05,0,0.5
hist ydis -0.0483,-0.01294,0.5
hist ydis -0.0433,-0.025,0.5
hist ydis -0.03536,-0.03536,0.5
hist ydis -0.025,-0.0433,0.5
hist ydis -0.01294,-0.0483,0.5
hist ydis 0,-0.05,0.5
hist ydis 0.01294,-0.0483,0.5
hist ydis 0.025,-0.0433,0.5
hist ydis 0.03536,-0.03536,0.5
hist ydis 0.0433,-0.025,0.5
hist ydis 0.0483,-0.01294,0.5
;
;=====DIBUJAR=====
;
plot con d &
    hist 1 be 2000 po 0,50 s 50,50 yaxis label 'Unbalanced forces'&
    hist 2 8 14 20 26 32 38 44 po 0,0 s 50,50 yaxis label 'Desplazamiento'&
    axes
plot cut add pla dd 0 dip 0 or 0,0,0.5
plot set eye 0,0,-2

```

```
;
;=====CALCULAR 1500 PASOS=====
;
step 1500
;=====GUARDAR=====
;
his du 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 &
14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 &
27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 &
40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 b 3500 file C:\SIMULACION\Modelo_70_04_800
;
save C:\SIMULACION\Modelo_70_04.sav
```



## **APÉNDICE VI**

## **CÁLCULOS REALIZADOS CON EL MODELO 3DEC**



# APÉNDICE VI: CÁLCULOS REALIZADOS CON EL MODELO 3DEC

Tabla VI-1. Desplazamientos radiales medidos en el modelo para presiones de 10 MPa

Buzamiento $\beta$ (°)	Desplazamiento Radial ( $10^{-4}$ m)																																					
0	1,40	1,37	1,38	1,38	1,40	1,38	1,38	1,37	1,38	1,37	1,38	1,38	1,39	1,38	1,38	1,37	1,37	1,38	1,38	1,37	1,40	1,36	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	
10	1,22	1,36	1,30	1,37	1,41	1,45	1,47	1,44	1,41	1,37	1,31	1,36	1,25	1,45	1,31	1,38	1,41	1,45	1,46	1,44	1,41	1,37	1,31	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44
20	1,37	1,37	1,51	1,72	1,92	2,08	2,15	2,08	1,91	1,72	1,51	1,37	1,37	1,37	1,37	1,52	1,72	1,91	2,08	2,15	2,08	1,91	1,73	1,50	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
30	1,41	1,52	1,86	2,26	2,73	3,02	3,16	3,02	2,73	2,24	1,88	1,53	1,39	1,54	1,89	2,25	2,73	3,02	3,17	3,02	2,72	2,27	1,87	1,51	1,15	0,89	0,63	0,37	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
40	1,48	1,75	2,33	3,05	3,74	4,25	4,44	4,25	3,74	3,05	2,33	1,76	1,44	1,75	2,33	3,05	3,73	4,25	4,44	4,26	3,74	3,05	2,32	1,76	1,10	0,84	0,58	0,32	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	
45	1,53	1,95	2,60	3,36	4,26	4,87	5,11	4,87	4,26	3,37	2,61	1,93	1,52	1,94	2,61	3,35	4,26	4,87	5,08	4,84	4,25	3,36	2,60	1,95	1,29	1,03	0,77	0,51	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	
50	1,59	2,13	2,92	3,89	4,83	5,32	5,62	5,35	4,85	3,87	2,93	2,12	1,58	2,12	2,92	3,87	4,85	5,32	5,60	5,30	4,83	3,85	2,93	2,12	1,46	1,20	0,94	0,68	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
60	1,84	2,70	3,69	4,97	3,59	4,38	4,72	4,46	3,57	5,01	3,70	2,70	1,82	2,69	3,73	5,10	3,61	4,37	4,72	4,39	3,56	5,18	3,81	2,71	1,99	1,48	1,12	0,86	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	
70	2,71	3,91	5,15	6,47	4,39	5,46	5,80	5,45	4,39	6,52	5,18	3,91	2,68	3,90	5,18	6,51	4,39	5,46	5,79	5,46	4,40	6,48	5,19	3,91	2,99	2,27	1,75	1,39	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
80	4,26	5,92	7,44	8,84	4,83	6,08	6,52	6,08	4,81	8,93	7,45	5,90	4,25	5,91	7,34	8,63	4,82	6,07	6,51	6,08	4,81	8,73	7,35	5,90	4,58	3,46	2,74	2,12	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76
90	6,71	8,56	9,98	11,1	5,17	6,61	7,05	6,60	5,25	11,1	9,99	8,57	6,77	8,54	9,99	11,2	5,29	6,64	7,05	6,66	5,29	11,3	9,99	8,53	6,71	5,17	4,05	3,23	2,61	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25
Ángulo, $\theta$ (°)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	375	390	405	420	435	450	465	480	495	510	525	540	

Tabla VI-2. Desplazamientos radiales medidos en el modelo modificado para presiones de 10 MPa

$k_n$ (MPa/m)	$k_s$ (MPa/m)	$\beta$ (°)	Desplazamiento Radial ( $10^{-4}$ m)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
$10^3$	$10^2$	40	0,81	2,01	3,65	5,57	7,47	8,90	9,51	8,91	7,45	5,56	3,66	2,00	0,82	2,03	3,65	5,56	7,45	8,85	9,47	8,86	7,43	5,55	3,64	2,02																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							

Tabla VI-3. Desplazamientos radiales medidos en el modelo modificado para presiones de 10 MPa

$k_n$ (MPa/m)	$k_s$ (MPa/m)	E (MPa)	$\nu$	$\beta$ (°)	Desplazamiento Radial ( $10^{-4}$ m)																														
$10^3$	$10^2$	4500	0.28	30	1,15	1,64	2,47	3,37	4,33	4,98	5,25	4,98	4,34	3,35	2,48	1,64	1,08	1,64	2,49	3,35	4,32	4,96	5,24	4,97	4,31	3,38	2,47	1,62							
$10^4$	$10^2$	4500	0.28	30	1,47	1,55	1,84	2,18	2,57	2,82	2,93	2,81	2,58	2,16	1,86	1,56	1,46	1,57	1,86	2,17	2,57	2,81	2,94	2,81	2,56	2,18	1,84	1,54							
$10^3$	$10^3$	4500	0.28	30	1,23	1,50	2,02	2,61	3,28	3,73	3,93	3,73	3,29	2,60	2,04	1,50	1,25	1,51	2,04	2,61	3,29	3,72	3,93	3,73	3,28	2,62	2,02	1,49							
$10^5$	$10^3$	4500	0.28	30	1,47	1,54	1,82	2,14	2,51	2,75	2,86	2,74	2,52	2,12	1,83	1,55	1,45	1,55	1,84	2,13	2,51	2,74	2,86	2,75	2,51	2,14	1,82	1,53							
$10^3$	$10^2$	4500	0.28	20	1,25	1,42	1,73	2,14	2,51	2,80	2,92	2,80	2,50	2,14	1,73	1,42	1,25	1,41	1,74	2,15	2,52	2,82	2,94	2,82	2,53	2,17	1,73	1,40							
$10^4$	$10^2$	4500	0.28	20	1,41	1,39	1,51	1,70	1,87	2,01	2,07	2,01	1,86	1,69	1,50	1,39	1,41	1,38	1,51	1,69	1,86	2,01	2,08	2,01	1,86	1,71	1,50	1,37							
$10^3$	$10^3$	4500	0.28	20	1,29	1,36	1,57	1,87	2,14	2,36	2,44	2,36	2,13	1,87	1,57	1,36	1,30	1,35	1,58	1,87	2,13	2,36	2,45	2,36	2,14	1,88	1,57	1,34							
$10^5$	$10^3$	4500	0.28	20	1,41	1,38	1,50	1,68	1,83	1,97	2,03	1,97	1,83	1,67	1,49	1,38	1,41	1,38	1,50	1,67	1,82	1,97	2,03	1,97	1,83	1,68	1,49	1,37							
$10^3$	$10^2$	10.000	0.28	40	0,37	0,90	1,63	2,48	3,33	3,98	4,25	3,98	3,32	2,48	1,64	0,90	0,38	0,91	1,63	2,48	3,32	3,95	4,23	3,96	3,32	2,48	1,63	0,91							
$10^4$	$10^2$	10.000	0.28	40	0,65	0,81	1,08	1,43	1,78	2,02	2,12	2,02	1,77	1,43	1,09	0,80	0,66	0,81	1,08	1,43	1,78	2,01	2,12	2,01	1,77	1,43	1,08	0,81							
$10^3$	$10^3$	10.000	0.28	40	0,45	0,82	1,38	2,05	2,73	3,24	3,46	3,24	2,72	2,05	1,38	0,82	0,45	0,83	1,38	2,05	2,72	3,22	3,44	3,22	2,71	2,04	1,37	0,83							
$10^5$	$10^3$	10.000	0.28	40	0,65	0,80	1,07	1,41	1,75	1,98	2,08	1,98	1,74	1,41	1,07	0,80	0,65	0,80	1,07	1,41	1,74	1,97	2,08	1,98	1,74	1,41	1,07	0,80							
$10^3$	$10^2$	1000	0.28	40	4,14	8,10	13,9	20,9	28,0	33,4	35,7	33,4	27,9	20,9	14,0	8,06	4,22	8,16	13,9	20,9	27,9	33,1	35,5	33,2	27,9	20,9	13,9	8,15							
$10^4$	$10^2$	1000	0.28	40	7,46	8,11	9,66	11,6	13,2	14,0	14,4	14,0	13,1	11,6	9,70	8,11	7,40	8,17	9,67	11,6	13,2	14,0	14,4	14,0	13,1	11,6	9,65	8,16							
$10^3$	$10^3$	1000	0.28	40	6,15	7,36	9,58	12,4	15,3	17,3	18,3	17,4	15,3	12,5	9,64	7,35	6,07	7,42	9,62	12,5	15,3	17,3	18,2	17,3	15,2	12,4	9,59	7,42							
$10^5$	$10^3$	1000	0.28	40	7,25	7,75	9,00	10,5	11,9	12,5	12,9	12,6	11,8	10,5	9,04	7,76	7,22	7,80	9,00	10,5	11,9	12,5	12,9	12,5	11,8	10,5	8,98	7,80							
$10^3$	$10^2$	4500	0.20	40	0,80	1,98	3,56	5,41	7,25	8,63	9,21	8,64	7,23	5,41	3,57	1,97	0,80	1,99	3,56	5,41	7,23	8,58	9,18	8,60	7,22	5,40	3,55	1,98							
$10^4$	$10^2$	4500	0.20	40	1,44	1,68	2,16	2,76	3,34	3,70	3,86	3,71	3,33	2,76	2,16	1,67	1,42	1,69	2,16	2,76	3,34	3,70	3,86	3,70	3,33	2,76	2,15	1,69							
$10^3$	$10^3$	4500	0.20	40	1,07	1,65	2,56	3,70	4,86	5,73	6,11	5,74	4,84	3,69	2,57	1,65	1,08	1,66	2,57	3,70	4,85	5,70	6,09	5,71	4,84	3,69	2,56	1,66							
$10^5$	$10^3$	4500	0.20	40	1,43	1,65	2,10	2,67	3,22	3,57	3,72	3,58	3,21	2,67	2,11	1,65	1,41	1,66	2,10	2,68	3,22	3,56	3,72	3,57	3,21	2,67	2,10	1,66							
$10^3$	$10^2$	10.000	0.20	40	0,36	0,90	1,62	2,47	3,30	3,94	4,20	3,94	3,30	2,47	1,63	0,90	0,37	0,91	1,62	2,46	3,29	3,91	4,18	3,92	3,29	2,46	1,62	0,91							
$10^4$	$10^2$	10.000	0.20	40	0,60	0,75	1,03	1,38	1,72	1,96	2,07	1,97	1,72	1,37	1,03	0,75	0,61	0,76	1,03	1,38	1,72	1,96	2,06	1,96	1,72	1,37	1,03	0,76							
$10^3$	$10^3$	10.000	0.20	40	0,43	0,79	1,32	1,97	2,62	3,11	3,32	3,12	2,61	1,97	1,33	0,79	0,43	0,80	1,32	1,97	2,61	3,10	3,31	3,10	2,61	1,96	1,32	0,80							
$10^5$	$10^3$	10.000	0.20	40	0,60	0,75	1,01	1,35	1,69	1,93	2,03	1,93	1,68	1,35	1,02	0,74	0,60	0,75	1,01	1,35	1,69	1,92	2,03	1,92	1,68	1,35	1,01	0,75							
$10^3$	$10^2$	1000	0.20	40	3,98	7,83	13,4	20,1	26,9	32,1	34,3	32,1	26,9	20,1	13,4	7,77	4,07	7,89	13,4	20,1	26,9	31,9	34,1	31,9	26,8	20,0	13,3	7,84							
$10^4$	$10^2$	1000	0.20	40	6,82	7,50	9,09	11,1	12,8	13,8	14,2	13,8	12,8	11,1	9,12	7,49	6,77	7,54	9,10	11,1	12,8	13,7	14,1	13,7	12,8	11,1	9,08	7,53							
$10^3$	$10^3$	1000	0.20	40	5,70	6,89	9,08	11,9	14,8	16,8	17,7	16,9	14,7	11,9	9,13	6,88	5,62	6,94	9,11	11,9	14,8	16,8	17,7	16,8	14,7	11,9	9,09	6,94							
$10^5$	$10^3$	1000	0.20	40	6,65	7,17	8,46	10,1	11,5	12,3	12,6	12,3	11,5	10,1	8,49	7,18	6,62	7,21	8,47	10,1	11,5	12,3	12,6	12,3	11,5	10,1	8,45	7,21							
Ángulo, $\theta$ (°)					0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345							

$\lambda$ (m)	$k_s$ (MPa/m)	$\beta$ (°)	Desplazamiento Radial ( $10^{-4}$ m)																																			
0,03	800	66	2,32	3,34	4,76	3,87	5,65	6,80	7,21	6,80	5,65	3,87	4,75	3,32	2,32	3,34	4,76	3,87	5,65	6,80	7,21	6,80	5,65	3,87	4,75	3,32	2,32	3,34	4,76	3,87	5,65	6,80	7,21	6,80	5,65	3,87	4,75	3,32
0,03	1600	66	2,24	3,21	4,57	3,72	5,42	6,52	6,91	6,53	5,42	3,73	4,56	3,20	2,24	3,21	4,57	3,72	5,42	6,52	6,91	6,53	5,42	3,73	4,56	3,20	2,24	3,21	4,57	3,72	5,42	6,52	6,91	6,53	5,42	3,73	4,56	3,20
0,03	3200	66	2,11	3,00	4,25	3,49	5,06	6,08	6,44	6,08	5,06	3,50	4,24	2,99	2,11	3,00	4,25	3,49	5,06	6,08	6,44	6,08	5,06	3,50	4,24	2,99	2,11	3,00	4,25	3,49	5,06	6,08	6,44	6,08	5,06	3,50	4,24	2,99
0,04	1600	66	1,76	2,58	3,61	4,99	6,58	8,12	4,54	7,53	6,72	5,00	3,63	2,59	1,76	2,58	3,61	4,99	6,58	8,12	4,54	7,53	6,72	5,00	3,63	2,59	1,76	2,58	3,61	4,99	6,58	8,12	4,54	7,53	6,72	5,00	3,63	2,59
0,04	3200	66	1,68	2,42	3,37	4,66	6,20	7,78	4,22	7,20	6,33	4,66	3,38	2,43	1,68	2,42	3,37	4,66	6,20	7,78	4,22	7,20	6,33	4,66	3,38	2,43	1,68	2,42	3,37	4,66	6,20	7,78	4,22	7,20	6,33	4,66	3,38	2,43
0,03	800	70	3,33	4,86	6,55	4,71	6,71	7,91	8,31	7,89	6,68	4,70	6,54	4,88	3,33	4,86	6,55	4,71	6,71	7,91	8,31	7,89	6,68	4,70	6,54	4,88	3,33	4,86	6,55	4,71	6,71	7,91	8,31	7,89	6,68	4,70	6,54	4,88
0,03	1600	70	3,10	4,55	6,15	4,47	6,38	7,55	7,94	7,53	6,37	4,47	6,14	4,56	3,10	4,55	6,15	4,47	6,38	7,55	7,94	7,53	6,37	4,47	6,14	4,56	3,10	4,55	6,15	4,47	6,38	7,55	7,94	7,53	6,37	4,47	6,14	4,56
0,03	3200	70	2,77	4,09	5,56	4,13	5,89	6,99	7,35	6,97	5,88	4,12	5,55	4,10	2,77	4,09	5,56	4,13	5,89	6,99	7,35	6,97	5,88	4,12	5,55	4,10	2,77	4,09	5,56	4,13	5,89	6,99	7,35	6,97	5,88	4,12	5,55	4,10
0,04	1600	70	2,50	3,65	4,84	6,12	4,18	5,19	5,51	5,19	4,18	6,13	4,86	3,65	2,50	3,65	4,84	6,12	4,18	5,19	5,51	5,19	4,18	6,13	4,86	3,65	2,50	3,65	4,84	6,12	4,18	5,19	5,51	5,19	4,18	6,13	4,86	3,65
0,04	3200	70	2,24	3,28	4,37	5,57	3,87	4,80	5,09	4,79	3,88	5,57	4,38	3,28	2,24	3,28	4,37	5,57	3,87	4,80	5,09	4,79	3,88	5,57	4,38	3,28	2,24	3,28	4,37	5,57	3,87	4,80	5,09	4,79	3,88	5,57	4,38	3,28
0,03	800	80	5,47	7,36	9,09	5,30	7,32	8,56	9,03	8,58	7,34	5,34	9,16	7,38	5,47	7,36	9,09	5,30	7,32	8,56	9,03	8,58	7,34	5,34	9,16	7,38	5,47	7,36	9,09	5,30	7,32	8,56	9,03	8,58	7,34	5,34	9,16	7,38
0,03	1600	80	4,64	6,42	8,08	5,00	6,92	8,12	8,58	8,14	6,95	5,04	8,15	6,45																								



Tabla VI-5. Desplazamientos radiales medidos en el modelo modificado para presiones de 10 MPa

$k_n$ (MPa/m)	$k_s$ (MPa/m)	$\beta$ (°)	Desplazamiento Radial ( $10^{-4}$ m)																							
$10^3$	$10^2$	40	0,81	2,01	3,65	5,57	7,47	8,90	9,51	8,91	7,45	5,56	3,66	2,00	0,82	2,03	3,65	5,56	7,45	8,85	9,47	8,86	7,43	5,55	3,64	2,02
$10^4$	$10^2$	40	1,14	1,80	2,82	4,09	5,37	6,34	6,75	6,34	5,35	4,08	2,83	1,78	1,16	1,81	2,82	4,08	5,36	6,30	6,73	6,31	5,35	4,08	2,81	1,81
$10^5$	$10^2$	40	1,56	1,80	2,28	2,88	3,44	3,80	3,96	3,80	3,43	2,88	2,29	1,80	1,55	1,81	2,28	2,88	3,44	3,79	3,96	3,80	3,43	2,88	2,28	1,82
$10^6$	$10^2$	40	1,71	1,84	2,16	2,54	2,85	3,00	3,07	3,00	2,84	2,54	2,17	1,84	1,71	1,85	2,16	2,54	2,85	2,99	3,07	3,00	2,84	2,54	2,16	1,85
$10^4$	$10^3$	40	1,15	1,73	2,66	3,81	4,98	5,87	6,26	5,88	4,97	3,81	2,67	1,72	1,16	1,75	2,66	3,81	4,98	5,84	6,24	5,85	4,96	3,80	2,65	1,74
$10^5$	$10^3$	40	1,55	1,78	2,22	2,79	3,32	3,66	3,81	3,66	3,31	2,79	2,23	1,77	1,54	1,79	2,23	2,79	3,32	3,65	3,81	3,65	3,31	2,79	2,22	1,79
$10^6$	$10^3$	40	1,70	1,82	2,13	2,49	2,79	2,93	2,99	2,93	2,78	2,49	2,13	1,82	1,69	1,83	2,13	2,49	2,79	2,92	2,99	2,93	2,78	2,49	2,12	1,83
$10^5$	$10^4$	40	1,47	1,61	1,92	2,31	2,68	2,94	3,05	2,94	2,68	2,31	1,93	1,61	1,46	1,62	1,92	2,31	2,68	2,93	3,05	2,93	2,68	2,31	1,92	1,62
$10^6$	$10^4$	40	1,60	1,68	1,88	2,12	2,33	2,43	2,48	2,43	2,32	2,12	1,89	1,68	1,60	1,69	1,88	2,13	2,33	2,43	2,48	2,43	2,32	2,12	1,88	1,69
$10^6$	$10^5$	40	1,47	1,49	1,58	1,69	1,74	1,75	1,77	1,76	1,74	1,69	1,59	1,49	1,48	1,50	1,58	1,68	1,74	1,75	1,77	1,75	1,74	1,69	1,58	1,50
Ángulo, $\theta$ (°)			0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345

Tabla VI-6. Desplazamientos radiales medidos en el modelo modificado para presiones de 10 MPa

$k_n$ (MPa/m)	$k_s$ (MPa/m)	$\beta$ (°)	Desplazamiento Radial ( $10^{-4}$ m)																							
$5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^3$	40	1,44	1,61	1,83	2,25	2,82	3,00	3,03	3,49	3,58	4,00	4,06	4,25	4,07	4,00	3,57	3,00	2,82	2,77	2,37	2,26	1,82	1,61		
$5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	40	1,34	1,43	1,55	1,80	2,12	2,23	2,25	2,52	2,58	2,84	2,88	3,00	2,88	2,84	2,57	2,23	2,12	2,09	1,87	1,80	1,55	1,43		
$5 \cdot 10^4$	800	40	1,46	1,64	1,87	2,33	2,94	3,13	3,16	3,65	3,75	4,19	4,26	4,46	4,27	4,20	3,74	3,13	2,94	2,89	2,46	2,34	1,86	1,64		
$5 \cdot 10^4$	800	52	1,58	1,96	2,23	2,82	3,47	3,67	3,69	4,33	4,42	4,98	5,02	5,20	5,03	4,99	4,42	3,66	3,47	3,42	2,95	2,82	2,23	1,96		
$5 \cdot 10^4$	800	54	1,69	2,03	2,30	2,85	3,48	3,65	3,67	4,18	4,25	4,70	4,72	4,77	4,69	4,67	4,25	3,65	3,48	3,44	2,96	2,84	2,29	2,03		
$5 \cdot 10^4$	800	70	2,71	3,70	4,08	5,15	6,42	6,47	6,87	6,85	4,39	5,31	5,57	5,80	5,56	5,30	4,39	6,52	6,47	6,43	5,31	5,18	4,09	3,69		
$5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^3$	40	1,45	1,62	1,84	2,25	2,82	3,00	3,03	3,49	3,58	3,99	4,05	4,25	4,06	3,99	3,57	3,00	2,82	2,77	2,36	2,25	1,84	1,62		
$5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	40	1,33	1,43	1,56	1,80	2,12	2,23	2,25	2,52	2,58	2,83	2,87	3,00	2,88	2,84	2,57	2,23	2,12	2,09	1,86	1,80	1,56	1,43		
$5 \cdot 10^4$	800	40	1,46	1,65	1,88	2,33	2,94	3,13	3,16	3,65	3,75	4,18	4,25	4,46	4,25	4,19	3,74	3,13	2,94	2,89	2,44	2,33	1,88	1,65		
$5 \cdot 10^4$	800	52	1,58	1,96	2,23	2,82	3,46	3,65	3,68	4,31	4,40	4,98	5,02	5,21	5,02	4,98	4,41	3,65	3,46	3,41	2,95	2,82	2,23	1,96		
$5 \cdot 10^4$	800	54	1,68	2,03	2,29	2,81	3,49	3,66	3,68	4,17	4,24	4,67	4,68	4,78	4,70	4,69	4,25	3,67	3,51	3,46	2,95	2,83	2,29	2,03		
$5 \cdot 10^4$	800	70	2,68	3,69	4,09	5,18	6,46	6,52	6,92	6,89	4,39	5,31	5,57	5,79	5,57	5,31	4,40	6,49	6,43	6,40	5,32	5,19	4,09	3,70		
Ángulo, $\theta$ (°)			180	190	200	210	220	230	232	234	240	250	260	270	280	290	300	310	320	322	324	330	340	350		

